



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,
para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

**MODELAÇÃO DE UM CONCEITO DE AUTOCARRO MODULAR LIGEIRO
EM MATERIAL SANDUÍCHE**

autor:

Paulo Henrique Carvalho Iglésias Neves

(mem06024)

Licenciado em Engenharia Mecânica pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

orientadores:

Professor Doutor António Augusto Fernandes
Professor Doutor António Joaquim Mendes Ferreira

11 de Novembro de 2008

Página intencionalmente em branco

RESUMO

Os veículos de serviço público (VSP) são usados no transporte de uma percentagem reduzida de passageiros, tanto nas economias industrializadas como nas que estão em desenvolvimento. De facto, os valores globais são 10% de quota no caso dos autocarros urbanos e cerca de 5% no caso dos autocarros de turismo. Os VSP irão contribuir para resolver os problemas causados pelo rápido crescimento dos transportes individuais. Estima-se que o número de veículos, em circulação na Europa, crescerá 40% até 2010 e que será então responsável por 22% do total das emissões de CO₂. A União Europeia estabeleceu objectivos ambiciosos para 2010: as emissões devem ser reduzidas em 30% relativamente aos valores de 1995.

Tal redução só pode ser conseguida através de uma evolução técnica radical. As tecnologias multimaterial, sanduíche ou híbrida, permitem óptimas oportunidades para reduzir o peso e melhorar a rigidez específica e a segurança passiva ao impacto, bem como reduzir drasticamente as emissões.

Os principais objectivos do projecto LiteBus¹ (www.litebus.com) e desta dissertação são a redução do peso e dos custos de produção, conseguido pelo desenvolvimento de um conceito arquitectónico radicalmente novo, onde são usados painéis estruturais em sanduíche compósito multimaterial em substituição das tradicionais superestruturas em aço ou alumínio, cobertas com painéis em chapa metálica. Os novos materiais também permitem elevada integração funcional e uma utilização mais eficiente do espaço interior.

A metodologia empregue centra-se no cálculo quase-estático baseado no ensaio de componentes como método equivalente de aprovação, de acordo com Anexo 8 do R66. Os modelos foram validados experimentalmente e os resultados foram comparados com os obtidos por outros parceiros do projecto LiteBus. Os modelos foram também melhorados gradualmente levando em consideração as sucessivas discussões em grupo.

As principais conclusões são:

- É viável modelar a estrutura recorrendo ao método dos elementos finitos, usando malhas de elementos sólidos.
- Não é viável a utilização de critérios de dano na análise da estrutura completa da secção, uma vez que detalhes potencialmente muito relevantes não são considerados à escala em questão ou não estão sequer definidos ainda, e porque seria necessário utilizar malhas com elementos de cascas para as quais não foi possível obter resultados representativos;
- Zonas mais pequenas, identificadas como sendo críticas, podem ser estudadas em detalhe, aí sim, usando malhas de elementos de casca e critérios dano.

¹LiteBus – Modular Lightweight Sandwich Bus Concept, com o número de contracto TST5-CT-2006-031321

Página intencionalmente em branco

ABSTRACT

Public service vehicles (PSV) are used in the transport of a small share of passengers, both in industrialized and growing economies. In fact, the global figures are 10% share in the case of buses and about 5% share in the case of coaches. PSV will contribute to solve the problems caused by rapidly increasing use of individual transport. The number of vehicles in Europe is expected to grow 40% until 2010 and then be responsible for 22% of all CO₂ emissions. The European Union set challenging goals for 2010: emissions must be reduced by 30% relative to values of 1995.

Such a reduction can only be made through a radical technological evolution. Multimaterials, sandwich or hybrid, provide great opportunities to reduce the weight, improve the specific stiffness and the crashworthiness, and, at the same time, reduce emissions drastically.

The main objectives of LiteBus project² (www.litebus.com) and thus the main objectives of this dissertation are the reduction of weight and production costs through the development of a radically new architectural concept, where modular multimaterial composite sandwich structural panels are used instead of the traditional steel or aluminum spaceframe superstructure, covered with metallic sheet panels. The new materials also allow a higher functional integration and a more effective use of interior space.

The methodology applied is centered in the quasi-static dimensioning based on the test of components as an equivalent method of approval, in accordance with Annex 8 of R66. The models were validated experimentally and the results were compared with the results obtained by the other partners in LiteBus project. The models were also gradually improved taking the group discussions into consideration.

The main conclusions are:

- It is possible to model the structure using the finite elements model, with solid elements meshes.
- It is not possible to use damage criteria in the analysis of the complete section structure, since potentially very relevant details are not taken into consideration at the scale the problem is posed or simple because they are not yet defined, or even because it would be necessary to use shell element meshes, which did not allow us to obtain representative results;
- Smaller areas, identified as being critical, may be studied in detail, using shell elements meshes and damage criteria.

²LiteBus – Modular Lightweight Sandwich Bus Concept, with contract number TST5-CT-2006-031321

Página intencionalmente em branco

RESUMÉ

Les transports publics routiers (PSV, de l'anglais) sont utilisés dans le transport d'un petit pourcentage des voyageurs, dans les pays industrialisés mais aussi dans les pays à économie émergente. En fait, les pourcentages globaux sont de 10% pour les bus et 5% pour les autocars. Les PSV permettront de résoudre les problèmes causés par la rapide croissance du transport individuel. On estime que le nombre de voitures en circulation en Europe grossira de 40% jusqu'à 2010 et sera, à ce moment là, responsable pour 22% de toutes les émissions de CO₂. L'Union Européenne établissait des objectifs assez ambitieux pour 2010: les émissions de CO₂ doivent être réduites de 30% par rapport aux valeurs de 1995.

Une réduction si importante ne sera possible que suite à une évolution technologique radicale. La technologie multimatériau, sandwich ou hybride, permet des opportunités exceptionnelles pour réduire le poids, améliorer la rigidité spécifique et la sécurité passive à l'impact, et bien aussi, réduire drastiquement les émissions.

Les principaux objectifs du projet LiteBus³ (www.litebus.com) et donc les principaux objectifs de cette dissertation, dans les limites d'application, sont la réduction du poids et des coûts de production, par le développement d'un concept architectonique radicalement nouveau, où les panneaux structurels modulaires en sandwich composite multimatériau sont utilisés en substitution des superstructures traditionnelles en acier ou aluminium, couverts avec des panneaux en feuille métallique. Les nouveaux matériaux permettent aussi une meilleure intégration fonctionnelle et une utilisation plus effective de l'espace intérieur.

La méthodologie utilisée est fondée dans le calcul quasi-statique basé dans le essai des composants comme méthode équivalente d'approbation, d'accord avec l'annex 8 de l'R66. Les modèles ont été validés expérimentalement et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par les autres partenaires du projet LiteBus. Plusieurs petites améliorations ont été graduellement faites aux modèles en considérant les successives discussions de groupe.

Les principales conclusions sont les suivantes:

- Il est possible de modéliser la structure en utilisant la méthode des éléments finis, avec des mailles de éléments continus.
- Il n'est pas possible d'utiliser critères d'endommagement dans l'analyse de la structure complète de la section, parce que des détails potentiellement très importantes ne sont pas considérées à l'échelle en question ou ne sont pas encore définis, et bien aussi parce que il serait nécessaire d'utiliser des mailles d'éléments de poutre pour lesquelles il n'a pas été possible d'obtenir des résultats représentatives;
- Les zones plus petites, identifiées comme critiques, peuvent être étudiées en détail en utilisant mailles d'éléments de poutre et critères d'endommagement.

³LiteBus – Modular Lightweight Sandwich Bus Concept, avec le numéro de contract TST5-CT-2006-031321

Página intencionalmente em branco

À minha mãe.

Página intencionalmente em branco

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento aos Professores Doutores António Augusto Fernandes e António Ferreira, orientadores deste trabalho, pela disponibilidade e apoio incondicionais, pelos valores de rigor científico incutidos e pelo seu lado humano revelados durante a elaboração deste trabalho.

O presente trabalho foi efectuado no âmbito do projecto LiteBus – Modular Lightweight Sandwich Bus Concept, com o número de contracto TST5-CT-2006-031321, financiado pelo 6th Framework Programme da Comunidade Europeia, cujo apoio agradeço. Estendo este agradecimento a todos os parceiros LiteBus.

No entanto, os meus agradecimentos não podem incidir apenas sobre o período em que se desenrolou o curso de Mestrado. Assim, levo em consideração toda a minha passagem pela FEUP.

Gostaria de apresentar um agradecimento aos docentes do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial pela formação científica que me proporcionaram quer ao longo da licenciatura, quer ao longo da parte lectiva do curso de Mestrado.

Agradeço de forma especial ao Professores Doutores António Torres Marques e Pedro Ponces Camanho, de quem sempre recebi total apoio e com quem aprendi imenso ao longo destes quatro anos em que tive o privilégio de trabalhar e conviver com eles.

Apresento os meus agradecimentos ao INEGI por proporcionar o acesso a muitos dos meios experimentais utilizados.

Queria ainda agradecer a todos com os quais lidei mais directamente no DEMEGI, no ID-MEC e no INEGI, o excelente ambiente de trabalho, a amizade e o apoio: Doutor Nuno Correia, Director da Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas, do INEGI, e pessoa com quem aprendi muito; Pedro Bandeira, Raúl Campilho e Pedro Portela, que me apoiaram imenso nos meus primeiros passos na construção de modelos de elementos finitos; Célia Novo, Sílvia Esteves, Tiago Canavarro, Doutora Celeste Pereira, Doutora Cristina Ribeiro, João Rodrigues, Hugo Faria, Senhor Sertório Lares, Senhor José Rocha Almeida, Marco Parente e Hannes Koerber.

Gostaria finalmente de apresentar o meu sincero agradecimento aos meus pais, por tudo o que fizeram, e à minha esposa Célia, à minha irmã Fátima, ao meu cunhado Fernando, e aos meus sogros, Armanda e Fernando Silva, por todo o apoio que me deram em situações difíceis e sem o qual a elaboração deste trabalho não teria sido possível.

Página intencionalmente em branco

I	Introdução e estado da arte	22
<hr/>		
	CAPÍTULO 1	Introdução e objectivos
		24
	1.1. Objectivos da dissertação	26
	1.2. Descrição do plano de trabalhos	26
	1.3. Organização da dissertação	28
	1.4. Bibliografia	28
<hr/>		
	CAPÍTULO 2	Revisão bibliográfica
		30
	2.1. Legislação aplicável	30
	2.1.1. Determinação do espaço residual	31
	2.1.2. Métodos de ensaio	31
	2.1.3. Aplicação do método do Anexo 8 do R66	32
	2.2. Critérios de dano	33
	2.3. Bibliografia	39
<hr/>		
II	Materiais e Processos produtivos	40
<hr/>		
	CAPÍTULO 3	Materiais
		42
	3.1. Fibras	42
	3.1.1. Fibras de vidro	44
	3.1.2. Tecidos	45
	3.2. Matrizes	45
	3.3. Materiais adoptados e propriedades consideradas	48
	3.3.1. Propriedades dos laminados	49

3.3.2. Propriedades do núcleo	53
3.4. O sistema de unidades coerentes do ABAQUS	54
3.5. Bibliografia	55
CAPÍTULO 4 Processos produtivos	56
4.1. Transferência de resina	58
4.2. Infusão por vácuo	59
4.3. Pultrusão	62
4.4. Comparação dos vários processos	65
4.5. Bibliografia	67
III Protótipos e ensaios	70
CAPÍTULO 5 Produção de protótipos	72
5.1. Pilar FEUP-Bus	72
5.2. Modelo do pilar LiteBus	74
5.2.1. Materiais	74
5.2.2. Processos	75
5.2.3. Produção	75
5.3. Canto do pilar	78
5.3.1. Materiais	78
5.3.2. Processos	79
5.3.3. Produção	79
5.4. Protótipos instrumentados	80
5.4.1. Primeiras tentativas	84
5.4.2. Pilar recto	87
5.5. Bibliografia	90
CAPÍTULO 6 Ensaios experimentais realizados	92
6.1. Ensaio à flexão em três pontos	92
6.1.1. Pilar FEUPBus	92
6.1.2. Pilar LiteBus	94
6.2. Ensaio de flexão de pilares rectos	95
6.3. Estudo das secções rectas dos pilares	100
6.4. Resultados dos ensaios	101
6.4.1. Ensaio de flexão em três pontos	101
6.4.2. Ensaio de flexão de pilares rectos	103
6.4.3. Medição de deformação	106
6.4.4. Comparação com pilares em aço	110

6.5. Bibliografia	111
IV Modelos numéricos	112
CAPÍTULO 7 Modelos iniciais	114
7.1. Modelos estáticos	114
7.2. Análise modal	126
7.3. Bibliografia	129
CAPÍTULO 8 Modelos desenvolvidos	130
8.1. Perfil Pultrudido	130
8.2. Modelo com um pilar e perfis pultrudidos	132
8.2.1. Modelo misto	132
8.2.2. Modelo sólido	132
8.3. Modelo para selecção da sequência de empilhamento	133
8.4. Modelo com painéis	136
8.5. Modelo do plataforma da célula	138
8.6. Modelo de cascas da secção (2 pilares)	139
8.7. Modelos dos ensaios realizados	140
8.7.1. Malha de elementos de casca	140
8.7.2. Malha de elementos sólidos	141
8.8. Modelo com painéis corrigido	142
8.8.1. Análise estática	142
8.8.2. Análise dinâmica	144
8.8.3. Análise modal	145
8.8.4. Análise térmica	147
V Análise e discussão dos resultados	148
VI Conclusões finais e trabalhos futuros	156
CAPÍTULO 9 Conclusões finais	158
CAPÍTULO 10 Trabalhos futuros	162
VII Índice remissivo	164

Página intencionalmente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Espaço residual (Todas as dimensões são em mm)	32
2.2. Mecanismos de rotura em compósitos	37
2.3. Mecanismos de rotura em compósitos (cont.)	37
3.1. Tecidos	45
3.2. Esquema da secção do pilar	49
3.3. Gráfico polar de E e G da camada unidireccional	51
3.4. Gráfico polar de E e G do laminado interior	51
3.5. Gráfico polar de E e G do laminado exterior	51
3.6. Propriedades dos laminados reforçados com vidro E	52
3.7. Propriedades dos laminados reforçados com vidro S	53
5.1. Corte da espuma PVC para o núcleo	72
5.2. Construção da pré-forma	73
5.3. Pré-forma do núcleo completa	73
5.4. Infusão de resina	74
5.5. Pilar feito	74
5.6. Moldação da superfície de trabalho	76
5.7. Moldação da parte mais interna do laminado exterior	76
5.8. Saco de vácuo para consolidação do laminado exterior	77
5.9. Laminado interior	77
5.10. O modelo completo	78
5.11. Produção do núcleo	79
5.12. Produção da pré-forma	79
5.13. Infusão da pele exterior e do núcleo	80
5.14. Infusão da pele interior	80
5.15. Canto do pilar	81
5.16. Arquitectura do sistema nervoso	83
5.17. Posicionamento da fibra óptica	84

5.18. Provete curvo com fibras ópticas	85
5.19. FBG-1	85
5.20. FBG-2	86
5.21. Entrada de fibras ópticas	86
5.22. Entrada posicionada	87
5.23. Pilar concluído	87
5.24. Posição dos FBG	88
5.25. Proximidade das zonas críticas	88
5.26. Entrada das fibras ópticas	88
5.27. Respostas espectrais do canal 1	89
5.28. Respostas espectrais do canal 2	89
5.29. Sensor de temperatura	90
6.1. Pilar colocado na amarra	92
6.2. Pormenor do dano	93
6.3. Pormenor do dano	93
6.4. Pormenor do dano no final do ensaio	93
6.5. Pormenor do dano após ensaio	94
6.6. Ensaio de flexão em 3 pontos dos dois provetes do pilar	94
6.7. Ensaio realizado	95
6.8. Ensaio realizado	96
6.9. Ensaio realizado	96
6.10. Ensaio realizado	97
6.11. Ensaio realizado	97
6.12. Ensaio a fechar do pilar feito no INEGI	98
6.13. Resultado do ensaio do pilar feito no INEGI	99
6.14. Ensaio a abrir do pilar feito no INEGI	99
6.15. Secções na zona dos painéis laterais	100
6.16. Secções na zona da janela	100
6.17. Secção da fibra óptica embebida	101
6.18. Gráfico com as curvas dos ensaios de flexão em três pontos	102
6.19. Rigidez calculada a partir dos resultados de ensaio	102
6.20. Gráfico F-d dos ensaios do pilar INEGI	103
6.21. Gráfico dos ensaios dos pilares produzidos em Clausthal	104
6.22. Gráfico de comparação das primeiras cargas	105
6.23. Regressão para cálculo da rigidez	105
6.24. Rigidez calculada a partir da tendência	106
6.25. Medições do sensor FBG durante o ensaio estático	107
6.26. Resolução do sensor FBG durante o ensaio estático	107
6.27. Esquema da montagem do ensaio dinâmico	108
6.28. Medições de carga e deslocamento durante o ensaio	108
6.29. Medições de deformação durante o ensaio dinâmico	109
6.30. Gráficos deformação vs. deslocamento e vs. carga, como medidos pelos sen- sores	109

6.31. Comparação provete Clausthal1 vs. pilar em aço	110
6.32. Comparação provete Clausthal3 vs. pilar em aço	111
7.1. Conceito 0 – Estrutura porticada simples e detalhes	115
7.2. Deslocamentos (Conceito 0 com diferentes configurações materiais)	116
7.3. Conceito 1 – Geometria importada pelo CIMNE	117
7.4. Conceito 1 (versão I) – simplificações de geometria	117
7.5. Conceito 1 (versão I) – Geometria considerada na análise	118
7.6. Conceito 1 (versão I) – Malha e condições de fronteira	118
7.7. Conceito 1 (versão I) – Atribuição de materiais e orientações de fibra	118
7.8. Conceito 1 (versão I) – Resultados numéricos (deslocamentos)	119
7.9. Conceito 1 (versão II) – Geometria e materiais considerados na análise	120
7.10. Conceito 1 (versão II) – Malha e condições de fronteira consideradas na análise	120
7.11. Conceito 1 (versão II) – Orientação das fibras	121
7.12. Conceito 1 (versão II) – Cargas e resultados da análise	121
7.13. Conceito 2 – Modelo e potenciais problemas	122
7.14. Conceito 1 (versão III) – Modelo considerado na análise	123
7.15. Conceito 1 (versão III) – Materiais	123
7.16. Conceito 1 (versão III) – Deslocamentos (Força = 10kN)	124
7.17. Conceito 1 (versão III) – Análise elasto-plástica	125
7.18. Componentes da estrutura	126
7.19. Estrutura CAETANOBUS	127
7.20. Estrutura SUNSUNDEGUI	128
7.21. Estrutura MAURI	128
8.1. Deformada do perfil pultrudido	131
8.2. Modelo pilares e perfis pultrudidos - Tensões	132
8.3. Modelo pilares e perfis pultrudidos - Deformação	133
8.4. Instante da simulação do impacto lateral	133
8.5. Mapeamento do dano máximo por camada	134
8.6. Gráfico do dano nas camadas ao longo da espessura	134
8.7. Gráfico do dano nas camadas ao longo da espessura	135
8.8. Gráfico do dano nas camadas ao longo da espessura	135
8.9. Gráfico do dano nas camadas ao longo da espessura	136
8.10. Modelo com painéis	137
8.11. Modelo com painéis - Trabalho externo	137
8.12. Modelo do chassis	138
8.13. Modelo do chassis	138
8.14. Primeira proposta de modelo de cascas com chassis	139
8.15. Malha do modelo de cascas com chassis	139
8.16. Modelo do ensaio do canto do pilar	140
8.17. Uma das configurações de carga usadas	140
8.18. Tensões no pilar	141
8.19. Deslocamentos	141

8.20. Deslocamentos durante o ensaio da curva do pilar	141
8.21. Deslocamentos durante o ensaio do pilar recto	142
8.22. Materiais do modelo corrigido	143
8.23. Resultados do modelo corrigido	143
8.24. Resultados da análise dinâmica	144
8.25. Resultados da análise dinâmica	144
8.26. Primeiro modo de vibração	145
8.27. Os três primeiros modos de vibração	146
8.28. Resultados da análise térmica	147
8.29. Resultados da análise térmica	147
8.30. Diferentes configurações com modelação idêntica	151
8.31. Módulo de compressão de uma espuma estrutural em função da temperatura	152
8.32. Detalhe dos resultados numéricos	153

ÍNDICE DE TABELAS

3.1. Diferentes tipos de estruturas de fibra	43
3.2. Propriedades básicas da fibra de vidro	44
3.3. Propriedades mecânicas de algumas resinas termoendurecíveis	48
3.4. Conceito 1 (versão III) – Materiais adoptados	49
3.5. Propriedades de algumas resinas termoendurecíveis	50
3.6. Propriedades das espumas estruturais de PVC	53
3.7. Sistema de unidades coerentes do ABAQUS	55
4.1. Problemas e soluções	59
4.2. Vantagens/desvantagens	65
4.3. Limitações de tamanho	65
4.4. Qualidade do laminado	65
4.5. Características de cura possíveis/necessárias	66
4.6. Processos paralelos e potencial de automação	66
4.7. Garantia da qualidade e robustez	66
4.8. Custos de material e de investimento	66
4.9. Gestão de resíduos e riscos ambientais	67
4.10. Qualificações necessárias do operário	67
4.11. Riscos técnicos do processo	67
6.1. Ensaios realizados	95
7.1. Conceito 1 (versão II) – Selecção da configuração de material	119
7.2. Conceito 1 (versão II) – Materiais adoptados	121
7.3. Conceito 1 (versão III) – Materiais adoptados	124
7.4. Resultados das análises modais	127
8.1. Deformações no perfil com ou sem espuma	131
8.2. Resultados das simulações dos ensaios	142

Parte I

Introdução e estado da arte

CAPÍTULO 1

Introdução e objectivos

Actualmente, a opinião pública é bastante sensível aos aspectos ambientais, energéticos e de conservação de materiais em todas as fases da vida dos produtos e coloca a indústria em geral e a indústria dos transportes em particular sob pressão crescente no sentido de reduzir as emissões de dióxido de carbono, CO_2 , e poupar energia. Isto reflete-se na legislação e normalização que regula a protecção ambiental e a segurança. Estima-se que a indústria europeia de transportes gerará 22% das emissões de CO_2 e que a população de veículos cresça 40% até ao ano 2010. Assim, a União Europeia (UE) está a estabelecer metas ambiciosas para 2010, que envolvem a redução das emissões em 30% relativamente aos valores de 1995 [1].

É geralmente aceite pela indústria que reduções desta grandeza só são possíveis com a mudança de tecnologia empregue. Actualmente, as tecnologias multimaterial – compósitos sanduiche e/ou híbridos – vão ganhando destaque na concepção de veículos. Estes materiais oferecem excelentes oportunidades para a melhoria do desempenho do produto em termos de resistência, rigidez e segurança passiva, permitindo simultaneamente reduzir o peso e aumentar o aproveitamento do espaço útil. No entanto, a sua utilização na construção de automóveis e autocarros está ainda atrasada relativamente ao aço.

Os veículos de serviço público (VSP) desempenham um papel muito importante na indústria dos transportes, tanto nos países industrializados como nos países em vias de desenvolvimento e poderão beneficiar bastante da utilização de construções sanduiche e multimateriais. Apesar da quota de passageiros transportados em VSP ser relativamente pequena quando comparada com a transportada em automóveis privados (10% no caso dos autocarros urbanos e 5% no caso dos autocarros de longo curso [1]), as restrições impostas para conservação ambiental e energética levarão a um aumento da procura de veículos de serviço público, em especial nos casos de acesso limitado, como centros de cidades.

As viagens em automóvel aumentaram a um ritmo estável de 2%/ano, enquanto as via-

gens em autocarro urbano aumentaram a 0,9%/ano e em autocarros de longo curso apenas 0,4%/ano. O Livro Branco da UE sobre a política de transporte europeu [2] estabelece para 2010, como principal objectivo, que a utilização de transportes públicos supere a de transportes privados, eliminando na origem a principal causa da poluição: o transporte individual. Este objectivo deverá ser alcançado através do desenvolvimento de transportes de elevada qualidade e segurança.

A presente dissertação foi escrita no âmbito do projecto europeu, LiteBus¹, que tem como objectivo o desenvolvimento de uma tecnologia inovadora para a construção de carroçarias de autocarros utilizando painéis portantes, em sanduiche multimaterial. Estes painéis têm que satisfazer requisitos rigorosos, tais como: elevados desempenhos estáticos e dinâmicos, elevada rigidez à flexão e à torção, acústica adequada, segurança passiva e activa, danos reduzidos nos peões em caso de acidente, segurança ao fogo, resistência à corrosão, fácil reparação e tempo de montagem reduzido. Os principais objectivos globais do programa do LiteBus são:

- Reduzir o peso e os custos de produção dos veículos de transporte terrestre através do desenvolvimento de uma tecnologia baseada na construção modular do autocarro, usando painéis sanduiches multimateriais portantes apenas em compósito, em vez da estrutura em aço ou alumínio revestida a chapas de diferentes materiais (metálicos ou não).
- Melhorar metodologias de concepção que reduzam os tempos de lançamento de produção, reduzindo o número de componentes, promovendo a integração funcional e permitindo o desmantelamento, a fácil reparação e a reciclagem.
- Desenvolver transportes urbanos de elevada qualidade;
- Contribuir para o aumento da utilização do transporte público;
- Contribuir para a melhoria da segurança rodoviária;
- Contribuir para a melhoria da qualidade no sector dos transportes terrestres.

Assim, os principais objectivos técnico-científicos são:

- Reduzir em 10 a 15% a tara do autocarro através de redução em 60% do peso da "carroçaria em branco"² (que tipicamente representa 20 a 25% do peso total do autocarro), relativamente aos autocarros em aço actuais. A rigidez da estrutura do autocarro em material compósito deverá ser equivalente à do correspondente em aço.

¹LiteBus – Modular Lightweight Sandwich Bus Concept, com o número de contracto TST5-CT-2006-031321

²"Body in white" ou "BIW" refere-se ao estágio da concepção ou produção de um automóvel onde a carroçaria metálica (incluindo portas, capots e tampa do porta-malas) já foi desenhada ou produzida, mas anterior à montagem em chassis e anterior à montagem do motor, dos vidros, electrónica e dos interiores. O nome surgiu da prática de produção anterior às monocarroçarias metálicas. Nessa altura, a maioria dos carros era produzido por muitas empresas na forma de estrutura simples sem os restantes componentes. Essas carroçarias eram, de facto, pintadas de branco, como primário para receberem posteriormente a cor escolhida pelo cliente.

O comportamento ao impacto em situações de capotamento será maior do que em estruturas de alumínio aparafusadas ou em aço.

- Redução do ruído em 20% e propriedades melhoradas de vibração.
- Maior resistência à corrosão com adequada segurança ao fogo.
- Segurança passiva dos passageiros melhorada.
- Redução de danos provocados a peões em caso de acidente.
- Aumento do espaço interior e da capacidade de acomodação de bagagens (10%, no mínimo).
- Aumento das competências de modelação por elementos finitos de estruturas sanduíche, usadas em autocarros.
- Validar ferramentas informáticas aplicáveis à avaliação da segurança passiva no caso específico de estruturas sanduíche.

1.1 Objectivos da dissertação

A questão de fundo que se coloca neste trabalho é a possibilidade de usar os materiais sanduíche compósitos na produção da estrutura do veículo. Para lhe responder deverá ser feita a modelação da estrutura do autocarro e analisar o seu comportamento, simulando as situações perante as quais é ou não aprovada. A metodologia empregue centra-se no cálculo quase-estático baseado no ensaio de componentes como método equivalente de aprovação, de acordo com Anexo 8 do Regulamento 66 (R66) da UNECE.

A investigação tem carácter inovador por ser uma aplicação de ferramentas comuns de indústrias mais avançadas – aeroespacial e aeronáutica – em aplicações onde os próprios materiais são, por si só, uma novidade.

1.2 Descrição do plano de trabalhos

O programa de trabalhos centra-se na modelação do comportamento estático e dinâmico de carroçarias de autocarro integralmente em material sanduíche com peles em material compósito.

O programa de trabalho desta tese está organizado em três tarefas:

- Tarefa 1 - Revisão bibliográfica
- Tarefa 2 - Modelos estáticos e dinâmicos

- Tarefa 3 - Escrita da dissertação

Tarefa 1 - Revisão bibliográfica

Proceder à revisão bibliográfica nos tópicos da tese por forma a identificar lacunas na investigação, bem como identificar necessidades e requisitos que serão dados a considerar no desenvolvimento dos modelos a realizar na Tarefa 2.

Tarefa 2 - Modelos estáticos e dinâmicos

Neste capítulo discutir-se-á o desenvolvimento dos modelos numéricos de elementos finitos que permitam analisar o comportamento estático, dinâmico e modal da carroçaria do autocarro. Da análise à solução proposta deverá resultar a garantia de que a carroçaria compósita em branco tem a mesma rigidez à flexão e à torção, bem como o mesmo comportamento modal de um carroçaria de autocarro que caracterize o estado da arte da construção metálica.

Actividade 2.1: Desenvolvimento do modelo numérico da carroçaria do veículo: geometria, propriedades dos materiais, geração de malhas, definição de condições de fronteira e das cargas

Serão desenvolvidos modelos de elementos finitos (EF) do conceito do veículo seleccionado segundo abordagens distintas e feita a selecção do que melhor representa a estrutura. Serão usados os modelos constitutivos dos materiais usados no fabrico da estrutura do veículo, para calcular os níveis gerais de tensão presentes na estrutura, nas condições do ensaio quase-estático equivalente ao capotamento da viatura.

Actividade 2.2: Análise quase-estática de EF

Serão determinados as tensões, as deformações e os deslocamentos da estrutura. Trata-se por isso do cálculo quase-estático baseado no ensaio de componentes como método equivalente de aprovação, de acordo com Anexo 8 do R66. A concepção resultante terá o peso mínimo necessário ao cumprimento dos requisitos impostos. O consórcio usará códigos comercialmente disponíveis e códigos próprios dos parceiros nas análises a efectuar. Será feita uma análise onde as mesmas cargas são aplicadas de forma dinâmica para a avaliação da capacidade do modelo para futuras análises dinâmicas após validação.

Actividade 2.3: Análise dinâmica de EF – comportamento modal

Será calculada a frequência fundamental da estrutura do autocarro em compósito e comparada com a das estruturas actuais em aço, limitando à partida a possibilidade de ocorrência de ressonância em condições normais de serviço. Os mesmos cálculos serão feitos no caso da estrutura em desenvolvimento e os resultados serão comparados. Da comparação, não deverá resultar uma rigidez inferior da estrutura sanduíche, quando comparada com a de aço.

Tarefa 3 - Escrita da dissertação

Escrita e submissão da dissertação.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em oito partes fundamentais.

Na parte I, além desta introdução, é feita uma recolha bibliográfica focalizada na legislação e nas normas aplicáveis, no dano e nos critérios usados e em estudos de laminados sujeitos a impacto.

Na parte II são apresentados os materiais e processos a ser usados na produção do protótipo da secção do LiteBus e que foram também usados na produção dos nossos protótipos.

Na parte III são apresentados os trabalhos de construção e ensaio de protótipos.

Na parte IV, são apresentadas os modelos numéricos.

Na parte V, é feita a análise e discussão dos resultados.

Na parte VI, são tecidas as conclusões finais.

Na parte VII, são propostos trabalhos futuros.

E finalmente, na parte VIII, é feito o índice remissivo dos tópicos mais relevantes.

1.4 Bibliografia

- 1 LITEBUS – Project Contract (FP6–031321) – Annex I – “Description of Work”, 5 de Junho de 2006.
- 2 Livro Branco - A política Europeia de transportes no horizonte 2010: a hora das opções – COM/2001/0370 final.

Página intencionalmente em branco

CAPÍTULO 2

Revisão bibliográfica

2.1 Legislação aplicável

A análise da estrutura deve cumprir os requisitos específicos constantes no Regulamento UNECE¹ 66 [1] e DIRECTIVA 2001/85/CE [2].

A aplicação deste normativo implica, a cada passo do processos de concepção, desenho, selecção de materiais, contratação, aprovisionamento, garantia da qualidade e recepção, a remissão para normas, regulamentos e leis que não serão aqui abordados. A versão do UNECE R66 imediatamente anterior à actual revisão (65) era praticamente idêntica à directiva 2001/85/CE. Na versão actual o regulamento apresenta alterações na sua redação que não nos impõem alterações ao nosso trabalho.

Faremos aqui apenas a discussão dos aspectos mais relevantes para a modelação. Antes disso, deixamos uma nota para três definições importantes e que muitas vezes suscitam dúvidas:

- "Unladen weight" é trata-se da "tara" ou "peso do veículo em ordem de marcha". É a soma do peso próprio do veículo, acrescido dos pesos do combustível, dos fluido de arrefecimento e óleos, das ferramentas e dos acessórios, da roda sobressalente, do extintor de incêndio e do condutor, expressa em quilogramas.
- O "kerb weight" ou "curb weight" é considerado equivalente. No entanto, "kerb weight" é inglês britânico e está de acordo com tradição europeia de incluir o condutor (75kg). Por seu lado, "curb weight" é inglês americano e refere-se a um peso que não inclui o condutor. Apenas como curiosidades refira-se que "kerb" ou "curb" significam ambos "lancil", que é aqui usado no sentido de limite da estrada e daí a

¹"United Nations Economic Commission for Europe" (UNECE) foi instituída em 1947 pela United Nations Economic and Social Council.

ideia de "em ordem de marcha". o termo "tara" no brasil segue a versão americana e também não inclui o condutor.

- O "Laden weight" é o "Peso Bruto", ou seja, o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, resulta da soma da tara com a lotação.

2.1.1 Determinação do espaço residual

Entende-se por espaço residual o volume definido no compartimento dos passageiros ao movimentar-se em linha recta o plano transversal vertical representado na figura 2.1(a) de modo que o ponto " S_R " representado na figura seja deslocado da posição do ponto " S_R " do banco lateral mais recuado para a posição do ponto " S_R " do banco lateral de passageiros mais avançado, passando nesse trajecto pelo ponto " S_R " de todos os bancos laterais intermédios. Os pontos " S_R " representados na figura 2.1(b) consideram-se situados a uma altura de 500 mm acima do piso por debaixo dos pés dos passageiros, a 300 mm da face interior da parede lateral do veículo e 100 mm para a frente do encosto do banco correspondente, no eixo médio do banco lateral em questão.

Os requisitos da Directiva 2001/85/CE e do Regulamento UNECE 66 são concordantes e exigem que a superestrutura do veículo deve ser suficientemente resistente para garantir que durante e depois da aplicação de um dos métodos de ensaio ou cálculo prescritos, nenhuma parte deslocada do veículo entra no espaço residual e nenhuma parte de espaço residual sai da estrutura deformada. Estes requisitos aplicam-se ao veículo incluindo todas as partes estruturais, membros, painéis e todas as partes rígidas projectantes como prateleiras de bagagens, equipamento de ventilação, etc. No entanto, elementos de compartimentação, anéis e outros membros de reforço da superestrutura do veículo e aplicações fixas como bares, kitchenettes ou casas de banho deverão ser ignoradas.

2.1.2 Métodos de ensaio

Cada modelo de veículo deve ser examinado com base num dos métodos a seguir enumerados (à escolha do fabricante) ou num método alternativo aprovado pela autoridade competente:

1. Ensaio de capotamento de um veículo completo;
2. Ensaio de capotamento de uma ou mais secções da carroçaria representativas de um veículo completo;
3. Ensaio quase-estático de uma ou mais secções da carroçaria; ou
4. Verificação da resistência da superestrutura por aplicação de um método de cálculo.

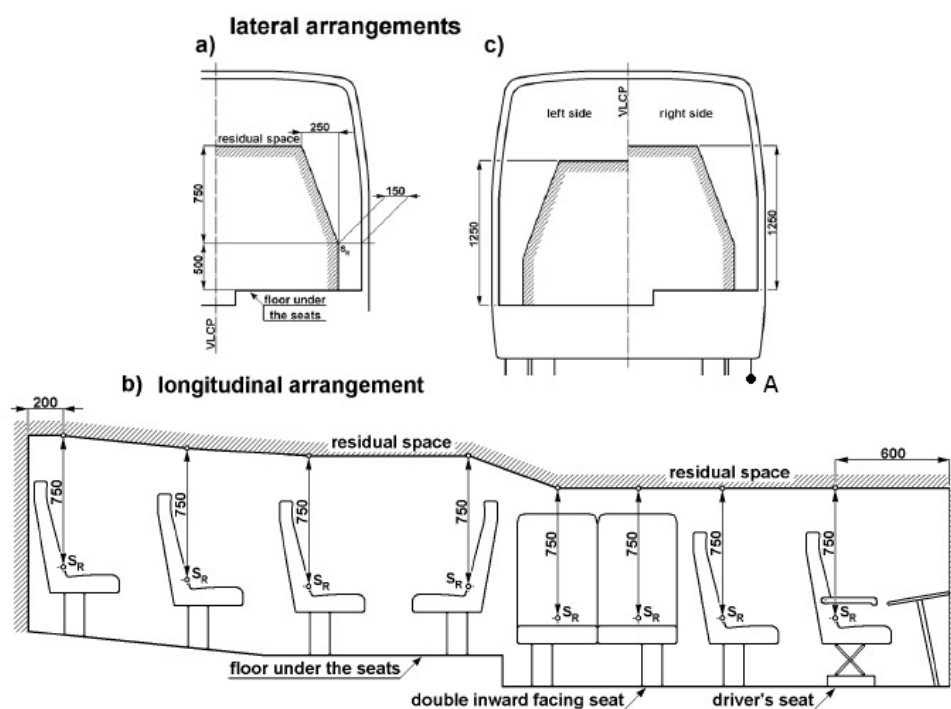


Figura 2.1: Espaço residual (Todas as dimensões são em mm)

2.1.3 Aplicação do método do Anexo 8 do R66

Neste trabalho foi feito o cálculo quase-estático baseado no ensaio de componentes como método equivalente de aprovação, de acordo com o anexo 8 do regulamento UNECE R66. O cálculo da energia total que deve ser absorvida, E^* , é feito considerando as seguintes hipóteses:

1. a secção transversal da carroçaria é rectangular.
2. o sistema de suspensão se encontra fixado de uma forma rígida.
3. o movimento da secção de carroçaria é uma rotação perfeita em torno do ponto A, da Figura 2.1.

Se o centro de gravidade (h) for determinado por métodos gráficos, E^* poderá ser dado pela fórmula:

$$E^* = 0,75M.g.\Delta h(Nm)$$

(2.1)

Esta deverá ser a energia absorvida pela estrutura, antes de se verificar a intrusão do espaço residual, quando sujeita a uma carga aplicada. A carga é aplicada com uma inclinação cujo ângulo, α , pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{800}{H_c}\right)$$

(2.2)

onde:

M = massa sem carga do veículo (em kg)

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Δh = deslocamento vertical do centro de gravidade do veículo sem carga (em m)

H_c = altura do *cant rail* do veículo sem carga (em mm)

Para efeitos de comparação de métodos, está a ser feito ao nível do consórcio um estudo comparativo dos ensaio das vigas compósitas com as de aço, numa tentativa de tratamento uniforme das zonas danificadas nos primeiros e das zonas plastificadas e rótulas plásticas nos segundos. Nos nossos modelos, essa abordagem não é considerada. O critério de dano encarregar-se-á de reduzir a rigidez em função do dano. Essa comparação não será tratada aqui.

Nas estruturas metálicas, consideradas estruturas aceitáveis, as rótulas trabalham dentro de limites (ver figura A8.A1.1 do regulamento UNECE R66) onde os valores negativos de rigidez estão aquém do limiar da instabilidade numéricos (e impossibilidade física). Da mesma forma, numa estrutura compósita igualmente aceitável, também não são esperados problemas dessa natureza.

2.2 Critérios de dano

O capotamento corresponde a uma situação pouco frequente mas com consequências muito graves. No caso dos autocarros, a estrutura deverá satisfazer os requisitos impostos pela legislação e pelos regulamentos, onde o capotamento constitui a principal base para o dimensionamento. No entanto, a simulação desta solicitação é muito pesada em termos computacionais, caso quisessemos ter simultaneamente a deformação da estrutura e a avaliação do dano em toda a sua extensão.

A estrutura pode operar em condições variáveis de carregamento, que tanto podem representar velocidades de fluência muito baixas como elevadas velocidades de impacto. É compreensível que muitos dos materiais se comportem de maneira diferente quando deformados a elevada velocidade do que quando o são de forma quase estática, justificando assim a necessidade de caracterização dinâmica. A elevada velocidades de carregamento, os efeitos da inércia e consequentemente da propagação de ondas tornam-se importantes e o

método de investigação deve de alguma forma envolver a propagação de ondas de tensão. Geralmente, é usada a técnica "split Hopkinson pressure bar" (SHPB) para determinar o comportamento de materiais isotrópicos sujeitos a grandes velocidades de carregamento. Esta técnica pode ser adaptada ao ensaio de compósitos à compressão, ao corte e à tracção. Um outro elemento fundamental na previsão do comportamento de materiais compósitos prende-se com a determinação da relação entre as tensões, deformações e as suas derivadas em ordem ao tempo. Estas relações designam-se equações constitutivas do material e sua determinação é o elemento-chave na análise e dimensionamento de elementos e sistemas estruturais. Um dos componentes importantes das equações constitutivas é a variação da resistência do material com a velocidade de aplicação do carregamento e a maneira como as tensões e as deformações estão relacionadas ao longo de uma estrutura sujeita a cargas variáveis. Um material inicialmente intacto desenvolve micro-vazios, micro-fissuras e descolamentos entre a fibra e a matriz que podem conduzir à perda de rigidez. Eventualmente, a coalescência destes defeitos conduz à rotura total do material sujeito à carga aplicada.

Os laminados compósitos são muito sensíveis ao dano por impacto. Um exemplo disso é o facto de um dano por impacto quase imperceptível poder contribuir para uma perda da ordem dos 60% da resistência à compressão de uma estrutura compósita. Em comparação com os metais usados tradicionalmente, os compósitos configuram-se novos e complexos. Apesar de a literatura ser profícua em publicações sobre dano por impacto em compósitos, muitas características continuam revestidas de mistério; em especial, as teorias sobre a tolerância ao impacto e as propriedades residuais após-impacto.

A combinação dos dois materiais numa estrutura sanduíche resulta num comportamento distinto de cada um dos componentes considerado isoladamente. As estruturas sanduíche, constituídas por um núcleo cobertas por peles são muito usadas em aplicações que beneficiem da sua elevada rigidez à flexão específica. Muitas das modernas vigas, cascas e painéis em sanduíche são feitos de laminados compósitos e um núcleo flexível. A complexidade do estado tensão deformação deu origem a um grande número de modelos para estruturas em sanduíche. Até recentemente, a maioria desses modelos baseia-se na incompressibilidade dos núcleos. A fiabilidade desses modelos torna-se dúbia no caso de núcleos macios.

No caso de um capotamento, a velocidade linear instantânea é cerca de 7m/s, uma vez que a resistência imposta pelo ar contribui para desacelerar a estrutura em queda. Pode, portanto, ser considerado um impacto de baixa velocidade. Deverá haver dissipação de energia por mecanismos de dano. Estes mecanismos deverão desenvolver-se de forma a que a estrutura deformada não invada o espaço residual.

Numa estrutura aceitável, esta zona não se expandirá demasiado e confinar-se-á tanto quanto possível à vizinhança da aresta de contacto sem nunca se aproximar do limite superior da janela (ou seja, da brusca diminuição da secção resistente que ocorre nos pilares). A solução construtiva adoptada deverá favorecer essa concentração de dano.

No entanto, permanece o problema da instabilidade que pode ocorrer devido à brusca

variação de rigidez. O modelo deverá ser feito tendo esse aspecto em consideração. No caso de uma estrutura compósita, cabe à subrotina que implementa o critério de dano diminuir de forma irreversível a rigidez dos elementos onde se verifica dano. Por este motivo, a aplicação do critério não pode restringir-se às áreas onde o dano é mais importante, mas deve abranger as áreas onde podem ocorrer instabilidades.

A interação entre as faces rígidas e o núcleo de baixa densidade resulta na possibilidade de ocorrência de numerosos modos de fratura como o colapso do núcleo, o encorilhamento das faces e o descolamento entre faces e núcleo. A caracterização do desempenho de estruturas sanduiche torna-se ainda mais complicado quando existe dano nas faces, resultante principalmente de impacto.

A delaminação consiste na separação de lâminas adjacentes. Isto pode dever-se às tensões interlaminares criadas por impacto, excentricidades de caminhos de carregamento na estrutura, descontinuidades da estrutura ou geradas durante a produção. A presença de delaminação resulta na redução da rigidez e da resistência do compósito; em especial, da resistência à compressão após impacto. Causa ainda alterações em parâmetros como o limite de encurvadura, frequência natural, etc. O crescimento da delaminação é muito instável. O comportamento ortotrópico de cada lâmina no laminado e a não coerência da rigidez individual de cada uma das várias lâminas à flexão, devido às diferenças de orientação, são apontadas como sendo as principais causas da delaminação.

O LaRC03 [7] é um conjunto de seis critérios de rotura para laminados poliméricos reforçados com fibras. Resulta da análise de mecânica da fratura de laminados fissurados desenvolvida por Dvorak e do conceito de plano de acção de Puck. Este critério baseado nos fenómenos físicos consegue prever a rotura da matriz e das fibras com exactidão e sem necessitar de ajuste de parâmetros de regressão. Para o caso de rotura em compressão transversa, o plano de fratura é calculado maximizando as tensões efectivas de Mohr-Coulomb.

Os seus autores obtiveram ainda um critério para o "fiber kinking"² calculando o desalinhamento sob carregamento e aplicando o critério de rotura da matriz no referencial do desalinhamento. São usados os modelos de mecânica de fratura das fissuras da matriz para desenvolver um critério para a matriz solicitada à tracção e para calcular os valores de resistência "in-situ". Os critérios LaRC03 foram aplicados pelos autores a alguns exemplos para previsão dos envelopes de carga de rotura e dos modos de rotura em cada uma das regiões do referido envelope. Os resultados foram também por eles comparados com as previsões usando outros critérios de rotura disponíveis e com resultados experimentais. Concluíram que as previsões obtidas com os LaRC03 se correlacionam bem com os resultados experimentais.

²Esta designação é mantida, dado que a tradução literal "kink" como "dobragem" nunca foi bem aceite e as propostas alternativas colidiram sempre com definições completamente diferentes. O que está em causa, independentemente do nome, é a criação de uma banda de rotura dos constituintes.

Na definição dos autores, o cerne da mecânica do dano, a ciência matemática que lida com as descrições quantitativas dos eventos físicos que alteram o material quando este é sujeito a cargas, é desenvolver um quadro que descreva a resposta do material causada pelo estado de dano em evolução. A maior dificuldade no desenvolvimento de um procedimento numérico rigoroso e computacionalmente eficiente para prever o crescimento do dano prende-se com o método segundo o qual são analisadas as alterações micro-estruturais do material e são relacionadas essas alterações com a resposta do material. Muitas teorias foram propostas para prever a rotura de compósitos. Apesar de terem sido conseguidos progressos significativos nesta área, não estava disponível uma teoria única que predissesse com exactidão a rotura a todos os níveis de análise, para todas as condições de carregamento e para todo o tipo de laminados de polímeros reforçados com fibras. Enquanto algumas teorias de rotura se baseiam nos fenómenos físicos, a maioria representa tentativas de fornecer expressões matemáticas que permitam o melhor ajuste aos resultados experimentais disponíveis e num formato o mais prático possível do ponto de vista do projectista.

Para o engenheiro estrutural, o critério de rotura deve ser aplicável ao nível da lâmina, do laminado e do componente estrutural. A rotura a estes níveis é muitas vezes a consequência de uma acumulação de micro-eventos de rotura. Assim, torna-se necessário perceber os micro-mecanismos de rotura para o desenvolvimento de teorias de rotura exactas.

O primeiro aspecto a considerar na análise estrutural de estruturas compósitas é a análise de tensões-deformações. Essa análise é a base do dimensionamento de estruturas compósitas, tanto em termos de rigidez como de resistência. Na análise de tensões em laminados, é frequente desprezar-se a presença de tensões residuais térmicas originadas pela cura da resina. Dado que cada camada tem diferentes coeficientes de expansão térmica na direcção longitudinal e na direcção transversal, geram-se tensões durante o arrefecimento desde a temperatura de cura até à temperatura ambiente. Assim, uma análise correcta só é possível considerando estas tensões residuais. A análise de materiais compósitos poliméricos deve também levar em consideração os complexos mecanismos de rotura destes materiais. Estes mecanismos podem ser divididos em mecanismos intralaminares e interlaminares.

Os mecanismos de rotura interlaminares, também conhecidos como "delaminação", correspondem à separação das camadas do laminado. Este mecanismo de rotura mostrado na Figura 2.2, é difícil de detectar usando técnicas tradicionais de inspecção não-destrutiva. Além disso, a delaminação reduz fortemente a rigidez à flexão da estrutura compósita e pode causar colapso estrutural. A análise da iniciação e do crescimento da delaminação pode ser feita usando os conceitos tradicionais da mecânica da fratura linear-elástica, tornando-se necessário considerar uma pré-fenda no problema de valores de fronteira representativo da estrutura compósita [4]. Uma outra hipótese será representar a iniciação e o crescimento da delaminação usando elementos finitos coesivos concebidos especificamente para esse fim [5,6]. Os mecanismos de rotura intralaminar abrangem todos os mecanismos de rotura que ocorrem ao nível da camada. Os mecanismos mostrados nas Figuras 2.2 e 2.3 podem ocorrer na direcção longitudinal (rotura da fibra à tracção ou *fibre kinking*) ou na

direcção transversal (rotura da matriz).

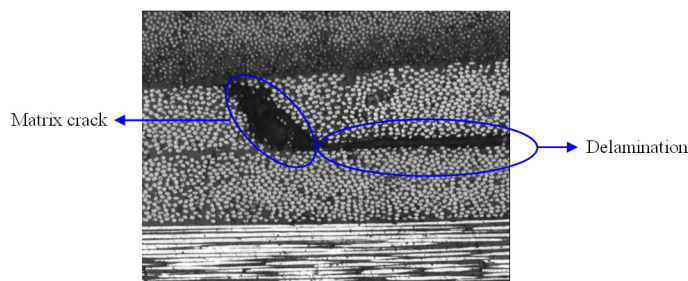


Figura 2.2: Mecanismos de rotura em compósitos
fonte:[3]

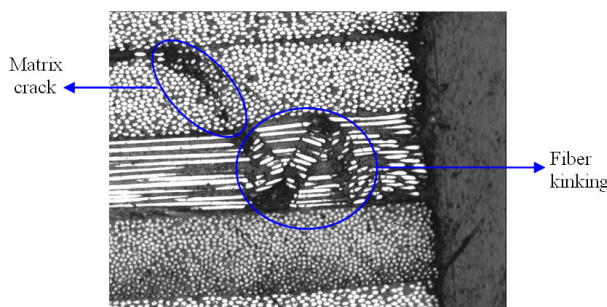


Figura 2.3: Mecanismos de rotura em compósitos (cont.)
Nota: *matrix crack* = fenda na matriz; *delamination* = delaminação
fonte:[3]

A iniciação dos mecanismos de rotura intralaminar é vulgarmente prevista usando um critério baseado na camada [7]. Dependendo da sequência de empilhamento e da geometria do laminado, a iniciação dos mecanismos de rotura intralaminar pode corresponder à rotura final. No caso dos laminados que podem acumular dano antes de colapso estrutural final, a utilização de um critério de rotura não é suficiente para prever a carga final de rotura da estrutura. Nestas circunstâncias, o critério de rotura deve ser usado em combinação com um modelo de dano progressivo que consiga simular a iniciação e propagação dos mecanismos de rotura intralaminar, bem como as cargas últimas à rotura [8,9]. Os critérios de rotura LaRC já foram implementados em subrotinas (programadas pelo utilizador) do ABAQUS³ e usadas com sucesso para prever os mecanismos de rotura intralaminar em todas as camadas dos laminados.

A utilização destes critérios levanta três dificuldades. Por um lado, o refinamento da malha necessário seria proibitivo perante as dimensões do componente e faria pouco sentido numa

³ABAQUS, SIMULIA, Rising Sun Mills, 166 Valley Street, Providence, RI 02909-2499, <http://www.simulia.com/>

geometria logo à partida muito simplificada. Isto levar-nos-ia a ultrapassar largamente a capacidade do computador e do próprio ABAQUS. Por outro lado, para usar este critério é necessário conhecer um conjunto mais alargado de propriedades do material, o que pressupõe um extenso programa de ensaios experimentais. Este programa só se justifica para um conjunto mais restrito de materiais em concurso. Finalmente, o critério está disponível em subrotinas cuja utilização não é ainda acessível à generalidade dos utilizadores. Em alternativa, embora sob pena de podermos fazer análises de dano mais limitadas, poderemos usar os critérios implementados no programa. No ABAQUS, o critério de iniciação do dano para os compósitos reforçados com fibras baseia-se na teoria de Hashin ([10]; Hashin, 1980). Estes critérios consideram quatro mecanismos diferentes de iniciação de dano; tracção das fibras, compressão das fibras, tracção da matriz e compressão da matriz. Os critérios de iniciação têm as seguintes expressões gerais:

- Tracção das fibras ($\hat{\sigma}_{11} \geq 0$):

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2$$

- Compressão das fibras ($\hat{\sigma}_{11} < 0$):

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2$$

- Tracção da matriz ($\hat{\sigma}_{22} \geq 0$):

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2$$

- Compressão da matriz ($\hat{\sigma}_{22} < 0$):

$$F_m^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2$$

Onde:

X^T – denota a resistência longitudinal à tracção;

X^C – denota a resistência longitudinal à compressão;

Y^T – denota a resistência transversa à tracção;

Y^C – denota a resistência transversa à compressão;

S^L – denota a resistência longitudinal ao corte;

S^T – denota a resistência transversa ao corte;

α – é o coeficiente que determina a contribuição das tensões de corte no critério de iniciação por tracção das fibras; e

$\hat{\sigma}_{11}, \hat{\sigma}_{22}, \hat{\tau}_{12}$ – são as componentes do tensor efectivo das tensões, $\hat{\sigma}$, que é usado para avaliar o critério de iniciação.

2.3 Bibliografia

- 1 – Regulation UNECE No. 66 (Rev.1/Add.65/Rev.1, 22 Fevereiro 2006) – uniform provisions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure ;
- 2 – DIRECTIVA 2001/85/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 20 de Novembro de 2001 relativa a disposições especiais aplicáveis aos veículos destinados ao transporte de passageiros com mais de oito lugares sentados além do lugar do condutor e que altera as Directivas 70/156/CEE e 97/27/CE .
- 3 P.P. Camanho, Application of numerical methods to the strength prediction of mechanically fastened joints in composite laminates, Ph.D Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, 1999.
- 4 R. Krueger, The virtual crack closure technique: history, approach and applications. NASA/CR-2002-211628. 2002.
- 5 P.P. Camanho, C.G. Dávila, Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials, NASA-Technical Memorandum 211737, National Aeronautics and Space Administration, U.S.A., 2002.
- 6 A. Turon, P.P. Camanho, J. Costa, C.G. Dávila, A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading, Mechanics of Materials, Vol. 38, 1072-1089, 2006.
- 7 C.G. Dávila, P.P. Camanho, C.A. Rose, Failure criteria for FRP laminates, Journal of Composite Materials, Vol. 39, 323-345, 2005.
- 8 P. Maimí, P.P. Camanho, J.A. Mayugo, C.G. Dávila, A continuum damage model for composite laminates: part I- constitutive model, Mechanics of Materials, 39, 897-908, 2007.
- 9 P. Maimí, P.P. Camanho, J.A. Mayugo, C.G. Dávila, A continuum damage model for composite laminates: part II- computational implementation and validation, Mechanics of Materials, 39, 909-919, 2007.
- 10 Hashin, Z. e Rotem, A., A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials, Journal of Composite Materials, Vol. 7, No. 4, 448-464 (1973)

Parte II

Materiais e Processos produtivos

As propriedades mecânicas e térmicas dos materiais compósitos são não isotrópicas por natureza e são, em geral, ortotrópicas. Os plásticos reforçados com fibras (PRF) são constituídos por fibras (vidro, carbono, aramida, fibras naturais, etc) e matriz plástica (termoendurecível ou termoplástica). A orientação das fibras é a responsável pela direccionalidade das propriedades mecânicas do laminado dado que estas são melhores ao longo da fibra do que nas direcções normais e na matriz. Isto significa que a rigidez do laminado compósito depende das orientações das forças ou dos momentos aplicados. Assim, por exemplo, os PRF têm muito melhores propriedades à tracção no plano do que à pressão normal ao laminado. No compósito, a matriz serve para manter as fibras numa posição pré-definida, para as proteger e para transferir as cargas entre elas.




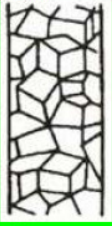

Além disso, a matriz condiciona a selecção do processo produtivo, a liberdade geométrica de conformação e a resistência térmica do compósito.

Os compósitos reforçados com fibras devem ser encarados como materiais estratificados, resultado do empilhamento de diferentes semi- produtos textéis, com orientações pré-definidas. A orientação das várias camadas permite obter uma estrutura anisotrópica, alinhada com a carga aplicada, permitindo a optimização da rigidez e da resistência específicas. Pelo contrário, os materiais isotrópicos, como o aço ou o alumínio, têm a mesma rigidez e a mesma resistência em todas as direcções, não permitindo este tipo de optimização.

3.1 Fibras

Os padrões estruturais das fibras são muito variados. Na Tabela 3.1, é mostrada uma revisão global dos principais tipos de fibra.

Tabela 3.1: Diferentes tipos de estruturas de fibra
fonte: [1]

Fibre	PETE PA	Aramid	Carbon	Al_2O_3 SiO_2	Glass
Structure	 1D fibrillar 2 phases	 1D fibrillar 1 phase	 2D layer-wise	 3D isotropic	 3D isotropic
Bonding	1D atomic, v. d. Waals	1D atomic, hydrogen bond v. d. Waals	2D atomic v. d. Waals	3D- atomic,	3D- atomic
Crystallinity	small	para (100%)	para (100%)	poly	amorphous
Orientation	small	very high	high	none	none

O desempenho das fibras sintéticas empregues actualmente deve-se:

- à estrutura molecular no interior da fibra ou do filamento. Esta é decisiva no seu comportamento, especialmente à tracção (Tabela 3.1). As poliamidas (PA) ou o polietileno tereftalato (PET), que são fibras textéis comuns, apresentam apenas propriedades moderadas, apesar de conseguirem um grande alongamento longitudinal, tornado possível pela sua reduzida cristalinidade e fraca orientação. Pelo contrário, a orientação da estrutura molecular das fibras de aramida é muito elevada na direcção longitudinal, tratando-se de cadeias rígidas, semelhantes a varões e quase totalmente cristalinas. A configuração estratificada bidimensional da grafite na fibra de carbono resulta numa estrutura quase totalmente cristalina, com elevada orientação na direcção longitudinal da fibra. Todos estes tipos de fibra apresentam um perfil anisotrópico de propriedades, devido às estruturas das moléculas que são orientadas longitudinalmente. Isto torna-se evidente nos diferentes valores característicos, como os de resistência, módulo de elasticidade, condutividade térmica e comportamento de expansão térmica, tanto na direcção longitudinal como na transversa.
- à estrutura molecular policristalina ou amorfa. As fibras cerâmicas têm propriedades superiores por causa da sua estrutura policristalina. As de vidro são amorfas e as propriedades são elevadas por causa das fortes ligações Si-O .

3.1.1 Fibras de vidro

São as que apresentam a melhor relação custo-benefício. Os filamentos textéis de vidro e as fibras de vidro com diâmetros entre 5 e $13\mu\text{m}$ são produzidos pelo processo de extrusão (*nozzle drawing*) [1]. Os filamentos de fibras de vidro são agrupados em fios (resultantes de um processo primário de fiação e que recebem em inglês a designação de "roving"), que podem ter vários milhares de filamentos (1K=1000 filamentos /roving). Antes de serem agrupados e enrolados, é-lhes aplicado um ligante que tem, entre outras, as seguintes funções:

- a) colar os filamentos formando um fio de tecer manuseável;
- b) impedir a fractura dos filamentos, que são muito sensíveis, durante a tecelagem; e
- c) melhorar a adesão entre a matriz polimérica e a superfície do vidro.

O tipo de vidro mais usado é o "E", um vidro de borosilicato de alumínio sem aditivos alcalinos. Existem outros tipos de vidro que são usados na produção de fibras:

- a) "R"/"S", com muito elevada resistência;
- b) "M", com módulo de Young muito superior; e
- c) "C", com propriedades químicas particularmente boas

Podemos constatar na Tabela 3.2 que o módulo de Young é relativamente baixo, excepto no vidro "M". Isto significa que as fibras de vidro não são usadas em nenhuma aplicação que requeira elevada rigidez, como as estruturas primárias de aviões. No entanto, a sua boa relação qualidade/custo faz com que sejam cada vez mais usadas na engenharia automóvel.

Tabela 3.2: Propriedades básicas da fibra de vidro

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>vidro E</i>	<i>vidro R/S</i>	<i>vidro M</i>	<i>vidro C</i>
Resistência à tracção	GPa	3,5	4,7	7,0	3,1
Módulo de Young	GPa	73	88	125	71
Deformação à rotura	%	$\approx 4,5$	5,0	$\approx 5,5$	3,5
Deformação específica	$\text{GPa} * \text{cm}^3/\text{g}$	1,38	1,8	2,8	1,3
Módulo específico de Young	$\text{GPa} * \text{cm}^3/\text{g}$	28,8	34	50,3	29
Diâmetro da fibra	μm	3-13	10		10
Densidade	g/cm^3	2,55	2,49	2,45	
Coefficiente de expansão térmica	$10^{-6}/\text{K}$	5-6	4	7,2	

3.1.2 Tecidos

O processamento de fibras textéis para a obtenção de tecidos e malhas é uma actividade ancestral que já há muito é usada em fibras estruturais; permitindo que os compósitos obtenham elevado desempenho e que sejam resolvidos problemas ao nível da formabilidade e da reprodutibilidade. Os vários tipos de tecidos podem ser seleccionados em função dos requisitos dos componentes (Figura 3.1).

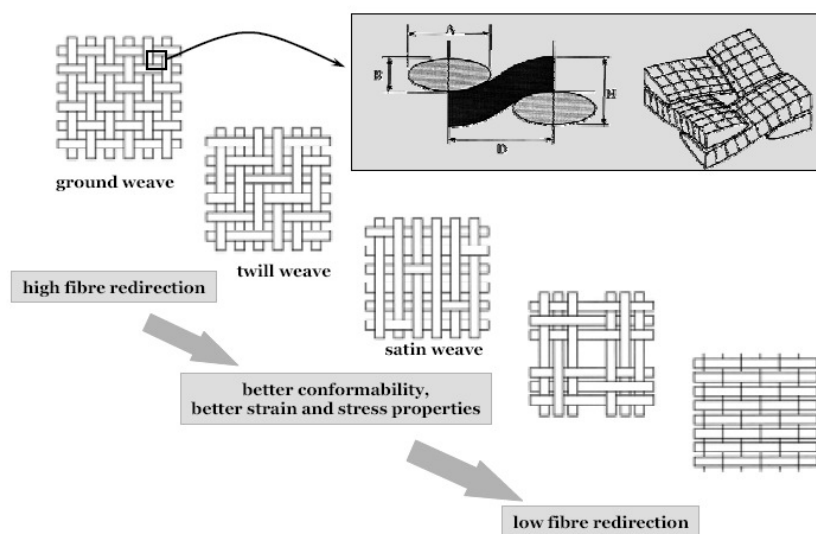


Figura 3.1: Tecidos
Fonte:[1]

Mais recentemente, apareceram no mercado outras configurações, como os *non-crimp fabrics*, nos quais várias camadas de fibra, com orientações diferentes, são depositadas sem qualquer intersecção e são apenas cosidas com linhas finas para manter a configuração. Esta solução permite propriedades superiores e processamento mais barato.

Na indústria automóvel em particular, é usada uma grande variedade de fibras curtas na forma de mantas, véus e pré-formas de fibras curtas [1].

3.2 Matrizes

As fibras e a resina são os componentes básicos dos compósitos avançados. As funções da resina no compósito são:

- Manter os filamentos nas devidas posições;

- Ajudar a distribuir as cargas;
- Proteger os filamentos contra o desgaste (durante o enrolamento e no compósito em si);
- Controlo eléctrico e propriedades químicas;
- Dar tenacidade ao corte interlaminar.

As propriedades da resina que devem ser consideradas no compósito curado são:

- A adesão à fibra é importante para a maioria dos sistemas e é função do acabamento superficial da fibra e da eficiência da adesão entre a resina e esse mesmo acabamento. A resistência adesiva deve ser conhecida, dado que controla as resistências ao corte e compressivas e influencia a resistência à flexão. O alívio do traccionamento das fibras, antes da cura, aumenta a prestação num campo biaxial de deformações ao eliminar o carregamento transversal das fibras. As fibras de aramida, por exemplo, têm resistências transversas muito baixas.
- A resistência ao calor é crítica, mas a escolha de uma resina com elevada temperatura de distorção deve ser precedida de um estudo judicioso das condições de utilização do componente. Obviamente, se o componente se destinar a funcionar a temperaturas iguais ou inferiores à ambiente, uma resina que cure a 175°C será uma escolha pobre dado que a resina tem um pouco menos de elongação à rotura e vai sofrer mais deformação de arrefecimento na cura.
- A resistência à fadiga, a resistência química e a resistência à humidade do compósito são os critérios chave na selecção mas devem ser avaliadas apenas em relação às propriedades mecânicas exigidas para o ambiente operacional. A resistência à fadiga será influenciada pela fibra e respectivo acabamento superficial e a orientação desta.
- A capacidade de ter uma elevada elongação à rotura da resina é importante para que possa transferir as cargas às fibras com maiores resistência e módulo. A rotura da primeira camada é um mecanismo comum nos compósitos e pode ocorrer numa direcção transversal às fibras. Uma maior elongação à rotura pode influenciar este modo de rotura. A elevada elongação à rotura é também necessária para ultrapassar grandes diferenças de coeficiente de expansão térmica entre a matriz e os reforços. Uma matriz frágil conduzirá a uma estrutura altamente micro-fissurada. Estas microfissuras enfraquecem as propriedades ao corte e impossibilitam os cálculos do coeficiente de expansão térmica, baseados na regra das misturas.

A introdução das fibras de aramida no início da década de 70 fez aparecer novas investigações sobre sistemas de resina. Muitos sistemas que funcionavam bem com fibras de vidro não eram apropriados para utilização com fibras avançadas. Muitos foram mesmo retirados do mercado por razões económicas e de toxicidade. Foram desenvolvidos novos sistemas de forma a conseguir:

- Baixa temperatura de cura;
- Longa vida em pote;
- elevada temperatura de distorção;
- Elevada elongação à rotura;
- Baixa toxicidade.

Este cinco factores são em parte mutuamente exclusivos (baixa temperatura de cura não resulta em elevada temperatura de distorção e temperatura de distorção elevada geralmente impede a capacidade de ter elevada elongação à rotura).

Foram desenvolvidos sistemas com uma longa vida em pote de forma a permitir a construção de grandes estruturas com alargados tempos de gel e mínima manifestação exotérmica. Os sistemas de temperatura elevada terão em geral temperaturas de cura mais elevadas e menor elongação à rotura. As resinas epoxídicas apresentam as seguintes vantagens:

- Adesão às fibras e a resinas
- Não formação de subprodutos
- Fraca retracção em cura
- Resistência aos solventes e químicos
- Um leque de características de resistência e flexibilidade
- Resistência à fluência e à fadiga
- Boas propriedades eléctricas
- Resinas sólidas e líquidas no estado não curado
- Uma vasta escolha de opções de cura
- Ausência de vapores de estireno e de toxicidade
- Podem ser retardadas ao fogo

No entanto, apresentam também as seguintes desvantagens:

- Resinas e agentes de cura algo tóxicos no estado não curado
- Pode absorver humidade
- Temperatura de distorção reduz-se no caso de ser absorvida humidade
- Alteração de dimensões e de propriedades físicas devidas à absorção de humidade
- Utilização limitada aos 200°C em seco

- Difícil combinar tenacidade e resistência a altas temperaturas
- Elevado coeficiente de expansão térmica
- Abundante libertação de fumos durante a combustão (se bem que melhor que os ésteres)
- Pode ser sensível à degradação por ultravioletas
- Cura lenta, dependente do tamanho do componente

As matrizes dividem-se em dois grandes grupos: termoendurecíveis e termoplásticas. No entanto, no nosso trabalho, apenas consideramos resinas termoendurecíveis (concretamente, resinas epoxídicas).

Nas termoendurecíveis encontramos as epoxídicas, as de poliéster insaturado e as fenólicas. São líquidas antes e durante o processamento e são posteriormente curadas, na geometria final. A sua estrutura interna forma uma rede tridimensional. Depois de curadas, não podem ser reprocessadas, fundidas ou soldadas. Estas matrizes são na maiorias das vezes reforçadas com fibras. As mais baratas são as resinas de poliéster insaturado, mas as suas propriedades mecânicas não são tão boas como as das epoxídicas e, devido ao seu elevado teor de estireno, causa maiores problemas ambientais. As resinas epoxídicas são usadas em quase todas as aplicações onde se registam cargas elevadas, em especial nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. As resinas fenólicas têm elevadas propriedades ao fogo, pelo que são muito usadas em aplicações para interiores de veículos, em especial de aviões. Para temperaturas elevadas, podem ser usadas resinas bismalimidas.

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas de algumas resinas termoendurecíveis
fonte: [1]

Propriedade	Unidade	UP	EP	BMI
Resistência à tracção	MPa	20–70	65–70	48–59
Módulo de Young	MPa	65–110	110–120	85–120
Deformação à rotura	%	2–10	1,7–2,0	1–2
Densidade	g/cm ³	≈1,2	1,24	1,28
Temp. trans. vítrea	°C	50–130	>200	287

3.3 Materiais adoptados e propriedades consideradas

No início do processo de selecção de materiais, foi considerada também a possibilidade de usar fibras de carbono. No entanto, as primeiras simulações mostraram que as fibras de vidro seriam suficientemente fortes. Com base nesses cálculos iniciais, decidiu-se [2] usar laminados com espessura de 5 mm e uma fracção volúmica de fibra de 50 %, tanto na pele interior do pilar como na exterior, com as seguintes orientações:

Tabela 3.4: Conceito 1 (versão III) – Materiais adoptados

<i>Material</i>	<i>Espessura</i>	<i>Volume de fibra</i>	<i>Orientações</i>
laminado exterior	5mm	50%	80% a 0° , 20% a $\pm 45^\circ$
laminado interior	5mm	50%	20% a 0° , 80% a $\pm 45^\circ$

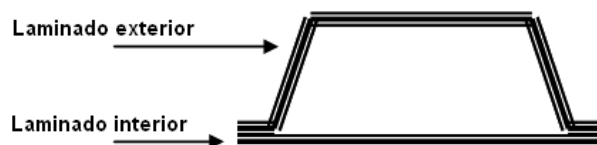


Figura 3.2: Esquema da secção do pilar

Os painéis laterais são produzidos por RTM. Em ambos os casos, existe núcleo de espuma. Foram pré-seleccionadas três espumas diferentes para ensaio; em especial, a altas temperaturas.

3.3.1 Propriedades dos laminados

As propriedades da fibra de vidro, consideradas pelo consórcio [1], são as indicadas na Tabela 3.2.

Serão consideradas as fibras de vidro tipo E para a definição de propriedades dos laminados.

As propriedades das resinas termoendurecíveis estão indicadas na Tabela 3.5. Destas escolheremos as epoxídicas, por terem sido as consideradas pelo CIMNE. Escolheremos no entanto os limites inferiores dos intervalos indicados.

Tabela 3.5: Propriedades de algumas resinas termoendurecíveis

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>UP – Poliéster ins.</i>	<i>EP – Epoxídica</i>	<i>BMI</i>
Resistência à tracção	MPa	20 – 70	65 – 70	48 – 59
Módulo à flexão	MPa	65 – 110	110 – 120	85 – 120
Deformação à rotura	%	2 – 10	1,7 – 2,0	1 – 2
Densidade	g/cm^3	$\approx 1,2$	1,24	1,28
Temperatura de transição vítrea	$^{\circ}C$	50 – 130	>200	287

O módulo de elasticidade da fibra de vidro a considerar no modelo é, portanto, $E_f = 73\text{GPa}$. O módulo de elasticidade da matriz epoxídica não foi fornecido mas fará sentido usar um valor de $E_m = 3\text{GPa}$. O volume de fibras é como vimos 50%. Assim, pela lei das misturas podemos obter os módulos do laminado unidireccional:

$$E_{1,UD} = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) = 73 \times 0.50 + 3 \times 0.50 = 38\text{GPa}$$

$$E_{2,UD} = \left(\frac{1 - V_f}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \right)^{-1} = 5.8\text{GPa}$$

Num empilhamento orientado ($\pm\theta$), temos:

$$E_{x,\theta} = \frac{1}{t} \sum_i t_i \cdot (E_{x,UD} \cos^4 \theta + E_{y,UD} \sin^4 \theta)$$

Para o laminado exterior, obtemos:

$$E_{1,LE} = 0.8 \times 38 + 0.2 \times (38 \cos^4 45^\circ + 5.8 \sin^4 45^\circ) = 32.59\text{GPa}$$

$$E_{2,LE} = 0.8 \times 5.8 + 0.2 \times (5.8 \cos^4 45^\circ + 38 \sin^4 45^\circ) = 6.83\text{GPa}$$

Para o laminado interior, obtemos:

$$E_{1,LI} = 0.2 \times 38 + 0.8 \times (38 \cos^4 45^\circ + 5.8 \sin^4 45^\circ) = 16.36\text{GPa}$$

$$E_{2,LI} = 0.2 \times 5.8 + 0.8 \times (5.8 \cos^4 45^\circ + 38 \sin^4 45^\circ) = 9.92\text{GPa}$$

Estes valores são melhor compreendidos se observarmos a distribuição em função da orientação.

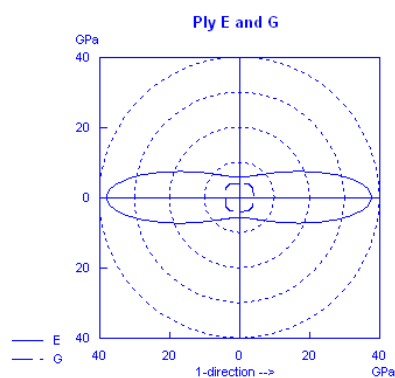


Figura 3.3: Gráfico polar de E e G da camada unidireccional

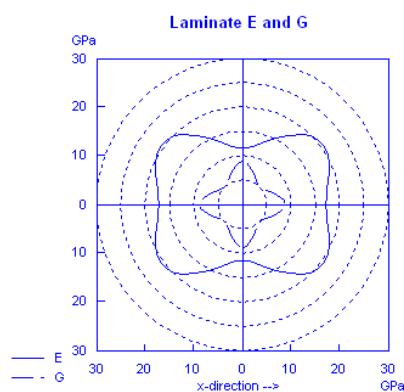


Figura 3.4: Gráfico polar de E e G do laminado interior

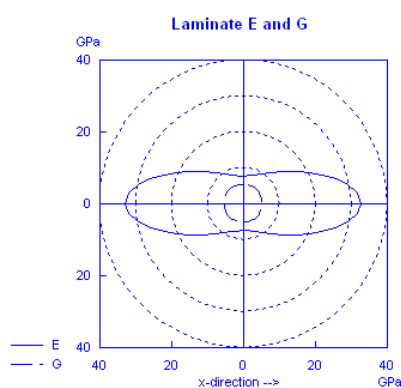


Figura 3.5: Gráfico polar de E e G do laminado exterior

Vemos que o laminado interior apresenta valores inferiores mas com menores variações em função da orientação. Uma maior fracção volúmica com orientação $\pm\theta$ resulta em valores

máximos de módulo menores e valores mínimos maiores. Ou seja, o laminado tende para quase-isotrópico. Um detalhe interessante que é visível, no gráfico do laminado interior é o facto de os valores máximos ocorrerem a $\pm 45^\circ$ e são maiores do que o previsto nos nossos cálculos feitos acima, que se referem a orientações de 0° e 90° .

Os valores de densidade da fibra de vidro e da matriz epoxídica a considerar no modelo a replicar em ABAQUS são $\rho_f = 2.55$ e $\rho_m = 1.24$, respectivamente. Assim, a densidade do laminado será aproximadamente:

$$\rho_{pele} = V_{matriz} \cdot \rho_{matriz} + V_{fibra} \cdot \rho_{fibra} = 1.9$$

As propriedades consideradas, incluindo as propriedades à rotura, no caso de o reforço ser feito com vidro do tipo E, são:

Hashin Damage model		From ESAComp		
		40% E-Glass - 60% Epoxy	50% E-Glass - 50% Epoxy	60% E-Glass - 40% Epoxy
E1	GPa	32	38	45
E2	GPa	8	9	10
E3	GPa	8	9	10
Poissons		0,3	0,3	0,3
G12	GPa	4	4,5	5
G13	GPa	4	4,5	5
G23	GPa	3,08	3,46	3,85
Longitudinal tensile strength	MPa	780	930	1100
Longitudinal compressive strength	MPa	480	570	675
Transverse tensile strength	MPa	31	33	35
Transverse compressive strength	MPa	100	110	120
Longitudinal shear strength	MPa	60	70	80
Transverse shear strength	MPa	60	70	80
Longitudinal tensile fracture energy	kJ/m2	73	73	73
Longitudinal compressive fracture energy	kJ/m2	96	96	96
Transverse tensile fracture energy	kJ/m2	0,25	0,25	0,25
Transverse compressive fracture energy	kJ/m2	0,7	0,7	0,7

Property	Unit	E - Glass		resin	
				EPIKOTE™ L 1100	Hexel EP1
Xt	GPa	3,5	2,4		0,078
Young's-Modulus	GPa	73	73	3,16	4,09
breaking strain	%	4,5	3,3	9	4,4
density	g/cm ³	2,55	2,6	1,15	1,21
Poisson	-		0,22		0,34
G	GPa				1,53
Xc	GPa				0,335

Sonja	ESAComp	Sonja	ESAComp
-------	---------	-------	---------

Figura 3.6: Propriedades dos laminados reforçados com vidro E

As propriedades consideradas, incluindo as propriedades à rotura, no caso de o reforço ser feito com vidro do tipo S, são:

Hashin Damage model		From ESAComp		
		40% S-Glass - 60% Epoxy	50% S-Glass - 50% Epoxy	60% S-Glass - 40% Epoxy
E1	GPa	36	43	50
E2	GPa	11	13	15
E3	GPa	11	13	15
Poissons		0,3	0,3	0,3
G12	GPa	5,5	6,5	7,5
G13	GPa	5,5	6,5	7,5
G23	GPa	4,2	5	5,8
Longitudinal tensile strength	MPa	1100	1330	1550
Longitudinal compressive strength	MPa	850	1030	1200
Transverse tensile strength	MPa	25	25	25
Transverse compressive strength	MPa	150	175	200
Longitudinal shear strength	MPa	70	80	90
Transverse shear strength	MPa	70	80	90
Longitudinal tensile fracture energy	kJ/m2	73	73	73
Longitudinal compressive fracture energy	kJ/m2	96	96	96
Transverse tensile fracture energy	kJ/m2	0,25	0,25	0,25
Transverse compressive fracture energy	kJ/m2	0,7	0,7	0,7

Property	Unit	S - Glass		resin	
				Epoxy	Hexel EP1
Xt	GPa	4,7	3,5		0,078
Young's-Modulus	GPa	88	86	4	4,09
breaking strain	%	5	4,1		4,4
density	g/cm ³	2,49	2,53		1,21
Poisson	-	0,22	0,24	0,35	0,34
G	GPa				1,53
Xc	GPa				0,335
		Sonja	ESAComp	Omar	ESAComp

Figura 3.7: Propriedades dos laminados reforçados com vidro S

3.3.2 Propriedades do núcleo

Das várias espumas apresentadas [1], começaremos por considerar as de PVC. Na Tabela 3.6 estão os valores considerados.

Tabela 3.6: Propriedades das espumas estruturais de PVC

Designação	Densidade [kg/m ³]	Resistência à compressão [MPa]	Resistência à tracção [MPa]	Resistência ao corte [MPa]	Módulo E [MPa]	Módulo G [MPa]	Deformação à rotura [%]
H45	48	0.55	1.2	0.5	40	18	10
H60	60	0.8	1.6	0.7	60	22	13
H80	80	1.2	2.2	1.0	85	31	20

De acordo com o nosso fornecedor habitual, Rebelco, as melhores opções seriam:

- Alcan Airex C63 80, com excelentes propriedades ao impacto mas não disponível em pequenas quantidades; o preço é 104 euro/kg (sem IVA);
- Alcan Airex C70 75, que pode ser fornecido de imediato; o preço é 99 euro/kg (sem IVA).

Nas simulações considerámos a espuma de PVC Alcan Airex C7075, que é uma espuma de polímero reticulado com células fechadas que combina elevadas relações específicas de rigidez resistência, com uma tenacidade superior. Não esbroa, não tem CFC, a absorção de água é negligível e tem uma excelente resistência aos químicos. As reduzidas dimensões das células resultam numa excelente superfície de colagem compatível com a maioria das resinas e dos processos de produção. É ideal para ser usado como material de núcleo para uma grande variedade de estruturas sanduíche leves sujeitas a cargas estáticas e dinâmicas. Os valores usados para caracterizar a C7075 como material isotrópico foram os constantes na base de dados da ESAComp:

- $E = 83 \text{ MPa}$
- $G = 30 \text{ MPa}$
- $\nu = 0.3833$

Para análises mais avançadas, consideraremos os seguintes valores de tensões normais e de corte à rotura, também obtidos da base de dados da ESAComp:

- $\sigma_{c,núcleo} = 1.3 \text{ MPa}$
- $\sigma_{t,núcleo} = 1.95 \text{ MPa}$
- $\tau_{núcleo} = 1.2 \text{ MPa}$

3.4 O sistema de unidades coerentes do ABAQUS

Um cuidado básico na modelação em ABAQUS consiste em manter a coerência das unidades. A geometria dos nossos modelos está definida em milímetros. Por isso, consideramos a segunda coluna da Tabela 3.7 – SI(mm). Assim, num modelo em *mm*:

- a) a densidade dos materiais estará entre 4×10^{-11} tonelada/ mm^3 para uma espuma pouco densa e 7.8×10^{-9} tonelada/ mm^3 para o aço.
- b) o módulo de Young dos materiais estará entre 83 MPa para uma espuma de PVC (2000 a 4500 MPa para uma resina) e 210 000 MPa para o aço.
- c) um capotamento corresponde a uma energia de cerca de 125×10^6 mJ.

Tabela 3.7: Sistema de unidades coerentes do ABAQUS

Dimensão	SI	SI (mm)
Comprimento	m	mm
Força	N	N
Massa	kg	tonelada (10^3 kg)
Tempo	s	s
Tensão	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)
Energia	J	mJ (10^{-3} J)
Densidade	kg/m ³	tonelada/mm ³

3.5 Bibliografia

- 1 TU Clausthal, First Year Activity Report, October 2007, Confidencial
- 2 CIMNE, First Year Activity Report, October 2007, Confidencial

CAPÍTULO 4

Processos produtivos

Os processos de produção de compósitos podem ser classificados como sendo em molde aberto ou molde fechado. No primeiro caso, os processos mais comuns são a moldação manual e a projecção. Estes processos são lentos, são bastante agressivos para o ambiente e prejudiciais para os operadores. A tendência actual é no sentido da sua erradicação.

A compressão, injeção e transferência são exemplos de processos de molde fechado. Os processos que envolvem substratos pré-reforçados como a moldação por compressão, a moldação injectada, a moldação por vácuo ou em autoclave, usam materiais pré-impregnados ou compostos de moldação, consoante o caso.

As variantes da moldação por injeção com reacção (RIM) incluem uma versão com material reforçado (RRIM) – onde a resina em reacção é injectada numa cavidade onde foi colocada uma pré-forma de fibras de reforço – e uma versão estrutural (SRIM) quando o referido reforço é suficiente para tornar o componente candidato a aplicações estruturais. Os processos podem ainda ser distinguidos pelo facto de serem, ou não, contínuos ou directos. Dois bons exemplos de processos contínuos são o enrolamento filamentar e a pultrusão. Quando os passos do processo ocorrem sequencialmente, a produção diz-se por lote.

Geralmente, o material compósito é produzido durante a produção do componente ou da estrutura. A selecção do processo influencia a selecção dos materiais e da forma, e determina os custos. Deve identificar-se os processos viáveis na fase inicial do processo de selecção. Muitas vezes, um sector industrial tende a especializar-se num conjunto restrito de processos, para poder sentir-se confiante, dada a experiência que rapidamente acumula. Seja qual for o processo, a produção de compósitos envolve geralmente:

- Posicionamento/empilhamento do reforço – para definir a sua arquitectura inicial.
- Definição da forma do componente – compressão do reforço ou pré-impregnado, para

lhe conferir a forma final; normalmente recorrendo a um molde ou fieira.

- Infusão da matriz – por forma a submergir completamente as fibras do reforço na matriz polimérica e para extrair o ar e impedindo a formação de vazios.
- Consolidação da matriz – cura de resina termoendurecível ou solidificação do termoplástico –, envolvendo:
 - Transferência de calor interna.
 - Cura ou solidificação.

A produção de uma estrutura de grandes dimensões em materiais compósitos baseado em resinas termoendurecíveis pode ser conseguida recorrendo a vários processos. À partida, poderíamos mesmo afirmar que todos os processo de moldação de termoendurecíveis são candidatos. No entanto, a própria dimensão, e crescente complexidade das formas, resultam num aumento nada linear dos custos de produção das superfícies. Obter uma superfície de moldação de onde se possa retirar uma superfície final com acabamento classe A é bastante dispendioso num componente externo de carroçaria de um veículo ligeiro. Manter a mesma qualidade superficial e a mesma estabilidade dimensional num molde para construção de uma carroçaria de autocarro é por um lado um desafio técnico e comporta custos enormes. Assim, não é indiferente usar um processo de moldação fechada rígida, com molde e contramolde rígidos, ou usar uma moldação com contramolde flexível (como no caso da transferência de resina ligeira) ou de membrana (como na infusão por vácuo). Esta grande diferença explica porque os cascos de embarcações de grandes dimensões são em geral feitas numa variante da infusão de vácuo, o SCRIMP (patenteado pela Seamann Composites).

De novo, as dimensões, as forças de fecho necessárias e a complexidade da articulação dos componentes do molde, afastam por completo a possibilidade de serem usados processos baseados na compressão. Finalmente, as dimensões e os custos associados também desaconselham o recurso à autoclave.

A transferência de resina é um processo que pode permitir cadências competitivas para a indústria de construção de autocarros e existem actualmente sistemas de resina que aliam boas características mecânicas com boas características de processo, permitindo ciclos rápidos e obter superfícies imediatamente prontas a ser pintadas com acabamento classe A.

A infusão por vácuo poderá ser interessante para componentes de dimensões médias, para os quais se possam utilizar contramoldes em silicone, dado ser impensável basear a produção repetida de componentes na utilização de sacos de vácuo.

A pultrusão permite a obtenção de perfis que tanto poderão ser decorativos como estruturais. Apresenta a desvantagem de não permitir obter facilmente laminados quase-isotrópicos.

4.1 Transferência de resina

A moldação por transferência de resina (Resin transfer moulding – RTM) [1,2,3,4,9] é um processo de moldação líquida que consiste em injectar uma quantidade pré-determinada de resina para o interior da cavidade do molde, onde foi colocada a fibra de reforço. O molde deverá ter pontos de exaustão para permitir a saída do ar. Quando o molde está preparado, alimenta-se a cabeça de mistura com resina e catalizador nas proporções correctas. A mistura resultante é então transferida para a cavidade do molde para infundir as fibras. É um processo simples, mas deve ter-se algum cuidado na definição dos seguintes parâmetros:

- A força para fechar o molde e para o manter fechado.
- A melhor arquitectura e construção do molde.
- O sistema de aquecimento e arrefecimento do molde, as respectivas taxas e o seu controlo; bem como o número e frequência de moldações.
- A pressão e o tempo necessário para a infusão.

A moldação líquida depende muito da impregneção. Em RTM, a fibra é estática, a frente de resina move-se através da cavidade do molde e o fluxo é não saturado. A geometria da cavidade é considerada constante.

Para estudar o comportamento do material, devem ser consideradas a cinética química e a reologia. Devem também ser considerados os fenómenos de transporte (transferência de calor e fluxo em meio poroso) e as propriedades resultantes do compósito (mecânicas, tensões residuais e percentagem de vazios). Para modelar o processo de RTM, torna-se necessária a completa caracterização do componente e do molde. A concepção inclui a optimização, o planeamento, e a gestão do controlo e do abastecimento.

Existem seis variantes de RTM. As diferenças residem na rigidez do contra-molde e na opção de usar ou não vácuo para assistir o enchimento. No RTM clássico é utilizado um molde rígido. Se as saídas forem ligadas a uma máquina de vácuo, o processo é designado de transferência de resina assistida por vácuo (vacuum assisted RTM – VARTM).

Quando a pressão de enchimento necessária é mais baixa, pode usar-se um equipamento mais pequeno e pode construir-se um contramolde menos rígido. Este molde “flexível” permite uma maior acomodação da frente de resina em avanço, garantindo mesmo assim maior compactação na zona das entradas do que a que seria possível com uma membrana. A flexibilidade deve ser entendida no contexto da comparação com um contramolde metálico de construção clássica. Este processo é designado RTM Ligeiro (Light-RTM, ou como também é – menos correctamente – conhecido, RTM-Light) .

Componentes grandes ou muito grandes, podem ser produzidos por infusão por vácuo, sendo o fluxo de resina assegurado pela depressão nas saídas e por uma ligeira pressão

positiva na entrada. Nesta fronteira, alguns autores tendem a classificar o processo como de transferência de resina, e dão-lhe a designação de VARTM. No entanto, a pressão de entrada está limitada, dado que o seu aumento agrava os problemas de compactação.

Os principais problemas relacionados com a utilização da moldação por transferência de resina na indústria automóvel e algumas das soluções possíveis estão resumidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Problemas e soluções
Fonte:[2]

Problema	Causa	Solução
Sistema de resina		
◦ Impressão do do padrão do tecido de fibras	◦ Este fenómeno visual deve-se aos diferentes coeficientes de expansão térmica da fibra (baixo) e da resina (elevado)	◦ SPRINT patenteado pela Gurit (SP Resin INFusion Technology) e film superficial SF 95. ◦ Reichhold Polylyte 31520.
◦ "Paint pops"	◦ Solvente libertado através de micro-fissuras que ocorrem durante o manuseamento	◦ TCA (toughened resins class A)
Moldes		
◦ Elevados custos de produção	◦ Ferramenta ◦ Velocidade do processo	◦ Moldes em níquel, electroformado, de baixo custo. ◦ "Multiple Insert Tool" (Plastech).
◦ Zonas de fibra seca	◦ Pouca exatidão da cavidade ◦ Componentes do molde mal alinhados ou não vedando ◦ Saídas mal posicionadas	◦ Calibração.

4.2 Infusão por vácuo

Uma das mais tradicionais aplicações da infusão por vácuo [1,5,9] é a construção de cascos de barcos, em especial veleiros de competição e iates. Neste tipo de estruturas é necessário recorrer a técnicas que maximizem a utilização do potencial dos materiais. A infusão por vácuo permite explorar bem esse potencial e é uma técnica acessível. Não é uma técnica tão simples quanto possa parecer. Aliás, o tempo que decorre entre o momento em que o coordenador da equipa tem que decidir que a preparação foi concluída com sucesso e fim da cura é bastante delicado. Potencialmente, tudo pode correr mal. E um casco de veleiro pode levar meses a preparar e custa uma verdadeira fortuna.

Este processo mais do que técnica, envolve arte. Na sua versão mais rudimentar, os técnicos auscultam o molde com estetoscópios em busca de fugas de ar. Faz todo o sentido para

estruturas que são produzidas em exemplares únicos, como no caso dos veleiros ou de protótipos, dado permitir reduzir imenso os custos de moldação. No entanto, é um processo muito lento e falível que não se quaduna com os volumes de produção dos construtores de autocarros.

Outra das razões pela qual a infusão por vácuo é usada na construção de cascos é o facto de permitir construir num só passo uma estrutura sanduiche. Existem mantas com configuração de fibra que permitem o compromisso entre boas características mecânicas e elevadas permeabilidades, e materiais para núcleo com canais rápidos integrados específicos para este tipo de utilização.

Os moldes para este tipo de moldação podem ser feitos em qualquer material minimamente rígido para garantir estabilidade dimensional e resistência quando solicitado com o peso próprio, o peso do componente, dos acessórios de saco e dos operadores que procedem à montagem dos reforços e do saco. Apenas as partes completamente circundadas pelo saco apresentam requisitos estruturais. As partes em que o saco é feito apenas numa face as pressões (atmosféricas) impostas ao molde continuam equilibradas, pelo que não constituem carregamento.

Um aspecto importante na infusão da resina é o ciclo de depressão imposto. O valor máximo de depressão aconselhável depende da resina a usar. A informação dada pelo fornecedor é fundamental. Porém, esse valor deve ser mantido na saída, durante toda a fase de enchimento. Deve-se notar que na entrada de resina a pressão é sempre igual à pressão atmosférica e que na frente de resina (o limite entre a zona molhada e a zona seca) se estabelece um gradiente de pressão entre a pressão atmosférica e a pressão de "vácuo". Este aspecto é crucial.

Por um lado, coloca um problema de estabilidade dimensional e de controlo de composição. De facto, à medida que a área molhada do componente aumenta, a área de saco não compactado também aumenta. Nestas áreas, a fracção volúmica de resina aumenta e em certas configurações pode ser mesmo impossível manter a forma. Repare-se que nos cascos, as zonas mais próximas da vertical, próximas da borda, são as últimas ser molhadas.

Por outro lado, encerra um perigo: o saco ao levantar pode abrir caminho ao ar até fugas que estavam desactivadas. No limite, pode ser o suficiente para inutilizar a estrutura e arruinar todo o projecto. Há técnicas para remediar pequenos problemas. Mas só para os pequenos problemas.

Outros aspectos são igualmente importantes: pré-estabilização de vácuo, controlo de percursos concorrentes, avanço possível e fecho.

Após dar a montagem por concluída e isenta de fugas, e antes de preparar a resina, deve deixar-se a estrutura em estágio de estabilização de vácuo. Normalmente, uma estrutura de dimensão equiparável a um casco de veleiro é mantida em repouso durante três horas. Isto

permite que a máquina de vácuo acabe de retirar o ar alojado em áreas de reforço com permeabilidade mais baixa, que a manta de homogeneização de pressão seja completamente drenada e acabe de esvaziar o seu próprio reservatório.

Os percursos de resina devem ser tais que não haja a possibilidade de se formarem ilhas de reforço seco. Mal a resina completa o fecho da ilha, a pressão sobe nessa zona para a pressão atmosférica. Deixa de haver o gradiente necessário para promover o avanço da resina e o material permanece seco. Se a ilha for pequena, o problema ser resolvida por meio de uma mangueira auxiliar de vácuo com uma agulha de seringa na ponta. A agulha é espetada do saco, no centro da ilha. A frente volta a avançar e converge para a agulha. Quando a resina chega à agulha, esta é retirada usando a mesma técnica que os enfermeiros: a diferença reside no facto de o "penso" com que se pressiona e estanca a "ferida" ser uma pequena tira de adesivo de fecho de saco ("tacky tape"). Esta solução é uma solução de recurso. A infusão deve ser préviamente simulada numericamente e estudada, por forma a que tal cenário não ocorra. Um detalhe fundamental, é que esta mangueira de vácuo auxiliar tem forçosamente que estar ligada à armadilha de resina. A entrada de resina é muito rápida e o perigo de esta atingir a máquina é muito grande, tanto mais que o diâmetro do tudo é geralmente pequeno.

Isto relembra um aspecto económico negativo: a infusão não pode ser um processo solitário. Um só operador não consegue responder a todas as solicitações, em especial quando corre mal. Uma equipa envolve tradicionalmente um grupo alargado de pessoas. Desde os que fazem as tarefas correntes, aos que apenas olham e coordenam, passando pelos que resolvem emergências.

A resina leva tempo a infundir. Durante esse tempo as reacções químicas vão acelerando e, portanto, a viscosidade vai aumentando. Assim, a resina só pode avançar até uma certa distância. Essa distância deve ser testada com placas de teste dos mesmos materiais e confrontada com a curva de cura também previamente medida em estaleiro nas mesmas condições em que vai decorrer o processo. Nas estruturas maiores existem canais rápidos para distribuição das entradas por forma a garantir que a distância máxima é sempre inferior, com margem de segurança, ao avanço máximo possível. Os canais rápidos podem ser entalhes na espuma do núcleo ou acessórios distribuídos sobre o componente, no interior do saco. À semelhança do sistema circulatório animal, os acessórios que promovem a circulação a caudal constante são designados "aortas" e os canais ao longo dos quais se fez o abastecimento de resina são designados "veias". Estes canais, nas versões em que não são integrados na estrutura, geralmente tubos, tranças e espirais, devem ser colocados entre o tecido de arrancamento ("peel ply") e o filme desmoldante que isola a manta de homogeneização de pressão.

Finalmente, o fecho: o momento em que é travado o fluxo de resina. O ideal teórico é que a resina atinja os limites do componente simultaneamente, após ter sido molhada toda a área, aí estagnar até gelificar. Em alguns componentes isto é possível. Se a geometria permitir o avanço de uma frente única, pode colocar-se a admissão de resina num local o mais equidistante possível em termos de tempo infusão dos limites do componente. A "estagnação"

pode ser conseguida dentro de certos limites, separando estes limites do canal rápido de exaustão circundante através de uma banda de desaceleração. O material mais simples para a banda de desaceleração é o véu de superfície.

Quando este cenário quase ideal não é possível, espera-se que a resina atinja o limite na zona mais atrasada, estanque-se a admissão de resina e, no momento oportuno, estanque-se o fluxo de saída. Infelizmente, este momento oportuno para estancar o fluxo de saída é um segredo que se vai desvendando com a experiência. Genericamente, o que acontece imediatamente antes é o seguinte: como a entrada está fechada, o excesso de resina vai sendo retirado. É portanto a oportunidade de fazer aumentar a fracção volúmica de fibra e recuperar a definição geométrica. À medida que a pressão da resina vai baixando em todo o componente, aproximando-se do vácuo, o saco volta a recuperar a capacidade de compactação e espreme os excessos locais de resina. No entanto, outro processo ganha terreno, agora com efeito negativo: a degasificação, ou seja, a libertação cada vez mais intempestiva do estireno em excesso. As bolhas de estireno têm o mesmo efeito estrutural das bolhas de ar, contribuindo para diminuir as propriedades elásticas e para uma significativa diminuição da tenacidade. Do ponto de vista estético, tem um efeito ainda mais perverso que as bolhas de ar, dado que as micro fissuras que ocorrem devidas ao manuseamento e armazenagem, permitem que o estireno se liberte, impedindo a pintura na zona da fissura. Este defeito é designado por "*paint pop*".

4.3 Pultrusão

A pultrusão [1,7,9] é um processo automatizado de moldação contínua, em molde fechado, que se torna rentável para grandes volumes de produção de componentes de secção constante. Dada a uniformidade de secção, de dispersão de resina, de distribuição e de alinhamento de fibras, podem ser obtidos por pultrusão excelentes materiais compósitos para aplicações estruturais. O processo base consiste na tracção de fibras contínuas através de um banho de resina formulada, passando por olhais de pré-posicionamento e remoção de excesso de resina e, finalmente através da fieira aquecida, onde é definida a geometria da secção e o acabamento final.

Os perfis produzidos por este processo podem competir com os perfis tradicionais em aço ou alumínio, em termos de resistência específica.

O desenvolvimento do processo de pultrusão foi mais lento do que dos outros processos de produção de compósitos. A patente inicial foi registada nos Estados Unidos em 1951. No final da década de 1950, as máquinas de pultrusão para a produção de varão simples estavam em funcionamento em muitas fábricas. A maioria destas máquinas eram de tracção intermitente. Algumas produziam já componentes estruturais. Em meados dessa mesma década de 1950, foram construídas máquinas de tracção contínua. Nos anos 1970, houve um aumento dramático na aceitação pelo mercado, no desenvolvimento da tecnologia e na sofisticação da indústria de pultrusão.

O cerne do processo reside na fieira, que terá que ser maquinada com exactidão e rigor, e deverá ter a dureza e resistência ao desgaste necessárias para garantir a qualidade do produto e a continuação do processo. Trata-se de um molde aquecido, dado que a catalização é essencialmente térmica. Para este processo são assim necessárias resinas com formulação adequada. A reação de cura dá-se integralmente dentro da fieira; pelo que o componente vai saindo no estado final. O aquecimento da fieira condiciona a velocidade do processo e as propriedades do material resultante.

O arrefecimento do componente dá-se no exterior da fieira e cada porção de componente deve arrefecer antes de ser agarrada pelo sistema tractor. Existem dois tipos de sistema tractor: um par de lagartas em rotação oposta e o sistema de mordentes viajantes com actuação desfasada.

Os perfis rígidos são cortados em comprimentos pré-definidos. Os perfis flexíveis podem ser enrolados, podendo ser conseguidos comprimentos muito maiores.

O banho de resina ou outro sistema de impregnação satura as fibras ("wets out") com uma solução contendo resina, cargas, pigmento, catalizador e, eventualmente, aditivos. O interior do impregnador de resina ser cuidadosamente concebido para otimizar a saturação dos reforços.

Tanto à entrada como à saída do impregnador, os reforços devem ser mantidos organizados e destorcidos para que possam entrar correctamente na fieira. O pré-formador é uma matriz de olhais ou guias – geralmente em Teflon, polietileno de muito alta densidade, aço cromado ou ligas de aço especiais – que antecede a fieira e que além de posicionar as fibras, acumula a função de remover o excesso de resina e de as acomodar para uma entrada suave na fieira. A remoção do excesso de resina antes da entrada da fieira permite que sejam reduzidas as pressões hidroestáticas no seu interior.

Em certas aplicações, o compósito é pré-aquecido por um gerador de rádio-frequência, antes de entrar na fieira. A unidade é colocada entre o impregnador e o pré-formador. As aplicações mais comuns são reforçados apenas com filamentos de fibra.

Podem ser usados vários tipos de reforço e de resina, conseguindo-se uma vasta gama de propriedades nos produtos obtidos. O reforço confere rigidez, resistência à tracção e ao impacto e a resina confere resistência ao fogo, ao desgaste, à luz ultra-violeta e aos agentes corrosivos.

As principais propriedades dos componentes pultrudidos são:

- Elevada resistência – Maior resistência específica do que o aço. Pode ser usado na construção de super-estructuras de edifícios de vários andares, passadiços, pavimentos e plataformas.

- Leveza – Os perfis pultrudidos pesam cerca de 20-25% do correspondente em aço e 70% do correspondente em alumínio. São facilmente transportáveis, manuseados e içados. As estruturas podem ser integralmente construídas e parcialmente montadas, e enviadas assim para o estaleiro.
- Resistentes à corrosão – Os perfis pultrudidos não enferrujam e são imunes a um vasto leque de agentes corrosivos. Esta característica faz destes produtos uma escolha acertada para estruturas interiores e exteriores para a indústria alimentar, indústria química e do papel, estações de tratamento de águas e resíduos, aplicações marítimas ou em outros ambientes corrosivos.
- Isolamento – Os reforços de fibra de vidro usados na pultrusão têm baixa condutividade térmica e são isolantes eléctricos. No caso dos reforços em carbono, a condutividade eléctrica terá que ser ponderada em função da aplicação.
- Transparência electromagnética – Os perfis pultrudidos são transparentes às ondas de rádio, às micro-ondas e outras ondas electromagnéticas.
- Estabilidade dimensional – O coeficiente de expansão térmica dos produtos pultrudidos é ligeiramente inferior ao do aço e significativamente menor do que o do alumínio.
- Integração – A concepção cuidada do perfil pode permitir a integração de vários componentes num só, reduzindo o número de processo de fabrico e ligação. Pode ainda permitir a formação contínua de núcleos interiores, resultando numa estrutura sandwich.
- Boas propriedades a baixas temperaturas – Os perfis reforçados com fibra de vidro têm excelentes propriedades mecânicas a temperaturas da ordem dos -60°C . A resistência à tracção e ao impacto são maiores a -60°C do que a $+25^{\circ}\text{C}$.
- Estética – Os perfis são pigmentados em toda a espessura e pode ser conseguida praticamente qualquer cor que se deseje. Existem véus de superfície especiais que permitem criar texturas (veio de madeira, mármore, granito, entre outros).

4.4 Comparação dos vários processos

Nas tabelas seguintes será feita a comparação entre pultrusão, transferência de resina e infusão.

Tabela 4.2: Vantagens/desvantagens
fonte: [1]

Processo	Vantagens	Desvantagens
Pultrusão	Processo contínuo Perfis complicados	variabilidade limitada Limitações de empilhamento Insertos impossíveis
Transferência de resina/infusão	Livre configuração de fibras Fracção vol. de fibras elevada Processo fechado Insertos possíveis	Ferramentas caras ¹ Reprodutibilidade Manuseamento a ser melhorado

Tabela 4.3: Limitações de tamanho
fonte: [1]

Processo	Vantagens	Desvantagens
Pultrusão	Produção sem limite Perfis complicados Largura até 1.2m	Preço aumenta com as dimensões do perfil
Transferência de resina/infusão	Sem limites na infusão	Moldes muito pesados Processo de cura devida à infiltração

Tabela 4.4: Qualidade do laminado
fonte: [1]

Processo	Vantagens	Desvantagens
Pultrusão	elevado teor de fibra elevada reprodutibilidade boa qualidade superficial baixa porosidade	
Transferência de resina	superfície perfeita gerada pelo molde rígido	superfície deficiente gerada pelo contramolde flexível
Infusão	superfície perfeita gerada pelo molde rígido elevado teor de fibra	superfície má gerada pela membrana

Tabela 4.5: Características de cura possíveis/necessárias
fonte: [1]

Processo	Características de cura possíveis/necessárias
Pultrusão	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Ferramentas aquecidas para um processo energeticamente eficiente
Transferência de resina/infusão	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Cura em molde aquecido para reduzir tempo de cura e melhorar Tg ◦ Influencia o fluxo de Darcy através da viscosidade/temperatura

Tabela 4.6: Processos paralelos e potencial de automação
fonte: [1]

Processo	Processos paralelos	Potencial de automação
Pultrusão	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Não 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Elevado
Transferência de resina/infusão	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Corte de pré-formas ◦ Preparação de pré-formas 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Elevado, depende do investimento

Tabela 4.7: Garantia da qualidade e robustez
fonte: [1]

Processo	Garantia da qualidade	Robustez
Pultrusão	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Parâmetros da máquina (temperatura, etc.) ◦ NDT de peças curadas ◦ Boa caracterização da resina 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Muito elevada ◦ Processo muito controlado
Transferência de resina/infusão	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Controlo dos parâmetros da máquina ◦ Controlo da vida em pote 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Elevado, depende da experiência

Tabela 4.8: Custos de material e de investimento
fonte: [1]

Processo	Custos de material	Custos de investimento
Pultrusão	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Razoável, dependendo dos requisitos (temperatura, rigidez, resistência, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Elevado para a máquina e feiras
Transferência de resina/infusão	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Razoável, a resina depende dos requisitos ◦ Materiais para saco 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Moldes RTM caros ◦ Moldes VI aceitáveis

Tabela 4.9: Gestão de resíduos e riscos ambientais
fonte: [1]

Processo	Gestão de resíduos	Risco ambiental
Pultrusão	<ul style="list-style-type: none"> o Pouco desperdício o Material curado 	<ul style="list-style-type: none"> o Processo aberto (elevado risco)
Transferência de resina	<ul style="list-style-type: none"> o Pouco desperdício 	<ul style="list-style-type: none"> o Processo fechado (baixo risco)
Infusão	<ul style="list-style-type: none"> o Material de saco 	<ul style="list-style-type: none"> o Processo fechado (baixo risco)

Tabela 4.10: Qualificações necessárias do operário
fonte: [1]

Processo	Qualificação do operador
Pultrusão	<ul style="list-style-type: none"> o Média
Transferência de resina/infusão	<ul style="list-style-type: none"> o Alta

Tabela 4.11: Riscos técnicos do processo
fonte: [1]

Processo	Vantagens	Desvantagens
Pultrusão	<ul style="list-style-type: none"> o Processo controlado 	<ul style="list-style-type: none"> o Dimensões reduzidas
Transferência de resina/infusão	<ul style="list-style-type: none"> o Muito elevada reprodutibilidade 	<ul style="list-style-type: none"> o Elevada fracção volumica de vazios

4.5 Bibliografia

- 1 TU Clausthal, First Year Activity Report, October 2007, Confidencial
- 2 MIT, FEUP, IST, UMINHO; relatório do Pilot Project EDAM, 2007, Confidencial

RTM

- 3 Potter, Kevin, Resin Transfer Moulding, Chapman & Hall, London, 1997.
- 4 Kruckenberg, T. e Paton, R., Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures, Springer, 1^a ed., 1998.

Infusão por vácuo

- 5 Nasseh, Jorge, Manual de construção de barcos, Jorge Nasseh Barracuda Produtos e Tecnologia, Ltda, Rio de Janeiro, 2004 (www.barracudatec.com.br)

- 6 Correia, Nuno, "Analysis of the vacuum infusion moulding process", Tese submetida à Universidade de Nottingham para a obtenção do grau de Doutorado, Abril 2004

Pultrusão

- 7 Starr, Trevor (Ed.), Pultrusion for Engineers, CRC, 1^a ed., 2000
8 Meyer, Raymond W., Handbook of pultrusion Technology, 1985.

Comparação de processos

- 9 Åström, B.T., Manufacturing of polymer composites, Chapman & Hall, New York, 1997

Página intencionalmente em branco

Parte III

Protótipos e ensaios

CAPÍTULO 5

Produção de protótipos

5.1 Pilar FEUP-Bus

A construção do pilar contou com a colaboração do estudante do programa Leonardo da Vince, Mathias Kliem, nosso colega do Instituto Politécnico de Dresden. O primeiro passo consiste em cortar as placas de espuma em barras de 50x60mm de secção e 1,25m de comprimento.



Figura 5.1: Corte da espuma PVC para o núcleo

As barras foram então enroladas em tecido NCF de fibra de vidro ($\pm 45^\circ$). As quatro barras enroladas foram juntas e enroladas de novo com o mesmo tecido, completando a pré-forma do núcleo.



Figura 5.2: Construção da pré-forma

De notar uma técnica simples para o corte e manuseamento de tecidos: colagem de fita adesiva de ambos os lados ao longo da linha de corte. As colagens foram feitas com cola 3M 77.



Figura 5.3: Pré-forma do núcleo completa

Foi feita a infusão do núcleo em separado dada a complexidade da geometria. Os sacos mostrados nas figuras acima foram repetidos após substituição da placa de madeira por uma chapa de aço aluminizada. Não foi possível obter vácuo com a placa de madeira e a chapa de aço aluminizada provou ser um bom material, ao contrário da chapa galvanizada que impede a cura da resina. Como se vê optou-se por uma distribuição central superior ao longo de todo o pilar. Foi feita aceleração da admissão em toda a face superior, até ao bordos. A tomada de vácuo foi feita a todo o comprimento em ambos os lados, com desaceleração por interposição de véu.



Figura 5.4: Infusão de resina

Posteriormente foi feito um segundo saco de vácuo para infusão das peles. Neste caso, recorreu-se a uma admissão de resina dupla - uma para cada pele e uma tomada de vácuo única do lado oposto. O resultado é o pilar mostrado nas imagens seguintes.



Figura 5.5: Pilar feito

5.2 Modelo do pilar LiteBus

Foi feito um modelo do pilar do autocarro a partir do molde produzido por um dos construtores participantes no consórcio. Este modelo foi enviada para o INEGI, onde posteriormente foi feito um molde em resina de poliéster reforçada com fibra de vidro. Este novo molde tinha algumas modificações, em especial canais para distribuição de resina/vácuo com ligações embebidas e saídas para as fibras ópticas.

5.2.1 Materiais

O molde foi preparado com cinco camadas de agente desmoldante – *Formula Five*, da REXCO. O modelo foi depois construído por forma a constituir um componente oco (sanduíche sem núcleo). Foram usados os seguintes materiais:

1. Superfície exterior do laminado externo (superfície de trabalho)

- Resina F225 + endurecedor F20 ("Top-Coat" especial para moldes, da *Lange und Ritter*)
 - fibras curtas
2. Restante laminado externo
- Resina NEUKADUR EP 571 + endurecedor T8 de Altropol
 - tecido de fibra de vidro E, $2 \times 290g/m^2$
 - bandas de fibra de vidro E unidireccional $4 \times 290g/m^2$
3. Laminado interior
- Resina NEUKADUR EP 571 + endurecedor T8 de Altropol
 - manta de fibra de vidro E $600g/m^2$
4. como não foi usado um núcleo, foi colocada uma placa de madeira para ajudar a moldar o laminado interior.

5.2.2 Processos

O laminado exterior foi feito por moldação manual com posterior consolidação por saco de vácuo e o laminado interior foi feito por simples moldação manual.

5.2.3 Produção

O molde foi limpo e encerado cinco vezes. Foi aplicada a resina F225 com uma trincha e foram colocadas fibras curtas, o mais uniformemente possível, sobre a resina. Deixou-se a resina curar.



Figura 5.6: Moldação da superfície de trabalho

Uma camada tecido de fibra de vidro E, $2 \times 290g/m^2$, foi depositada e impregnada manualmente. A acomodação mostrou-se muito mais difícil na zona do canto.

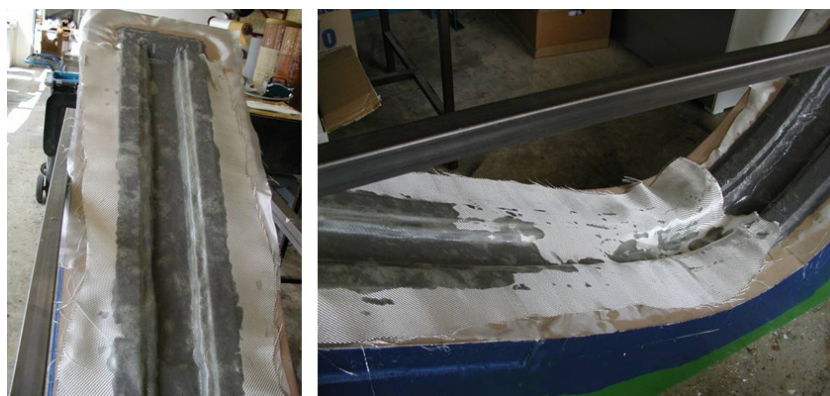


Figura 5.7: Moldação da parte mais interna do laminado exterior

Logo em seguida, foram depositadas seis camadas de bandas de fibra de vidro E unidirecional com 10cm de largura (ca. $2 \times 290g/m^2$) e impregnadas manualmente. Preparou-se e esvaziou-se o saco de vácuo para melhorar a consolidação do laminado.

Depois de concluída a cura da resina, retirou-se o saco de vácuo. A superfície livre do laminado foi lixada e sobre a parte central pousou-se uma placa de madeira fina. Os cortes foram feitos por forma a permitir o acompanhamento da curvatura do pilar, em especial no canto. A pele interior foi então laminada sobre a placa, garantindo uma adesão contínua e adequada ao laminado exterior ao longo dos bordos.



Figura 5.8: Saco de vácuo para consolidação do laminado exterior



Figura 5.9: Laminado interior

Deixou-se a resina curar e extraiu-se o modelo do molde. O resultado final é mostrado na figura 5.10.



Figura 5.10: O modelo completo

5.3 Canto do pilar

Foi feito um provete do canto do pilar do autocarro a partir do molde atrás referido. Este canto de pilar foi instrumentado. Infelizmente, apesar de o provete ter sido bem embalado, as fibras ópticas não sobreviveram ao transporte até Portugal, onde seria feito o ensaio em conjunto com a FIBERSENSING.

5.3.1 Materiais

O canto do pilar foi feito usando os seguintes materiais:

1. Resina EPIKOTE L1100 + endurecedor EPIKURE 294 (endurecedor rápido, 40%) e EPIKURE 295 (endurecedor lento, 60%), da *Hexcion*
2. "Tecido" unidireccional de fibra de vidro E, $2 \times 600g/m^2$
3. Non-crimp fabric $\pm 45^\circ$ de fibra de vidro E, $600g/m^2$
4. Espuma de PVC para o núcleo, da *DIAB*;
5. 2 fibras ópticas;
6. Cola 3M 77.

5.3.2 Processos

A sanduíche foi feita em dois passos, por infusão por vácuo:

1. Pele exterior ($[\pm 45^\circ, \pm 45^\circ, \pm 45^\circ, \pm 45^\circ, 0^\circ]_s$) em conjunto com o núcleo de espuma.
2. Pele interior ($[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, \pm 45^\circ, 0^\circ]_s$) com as fibras ópticas (na direcção 0° , entre a 7^a e a 8^a camada de fibras).

5.3.3 Produção

O molde foi limpo e encerado uma vez. Entretanto, foi cortada uma placa de espuma de PVC para obter três curvas com uma forma o mais aproximada possível. As três curvas foram empilhadas e coladas para obter o núcleo em bruto. Depois de seco, foi lixado até à forma final.



Figura 5.11: Produção do núcleo

O núcleo foi usado como base para a produção de uma pré-forma seca com fibras na configuração determinada pelo consórcio. As camadas foram empilhadas na sequência indicada e foram feitos alguns golpes por forma a permitir a acomodação das fibras no molde. Antes de cada camada, era aplicada a cola em spray 3M 77 para manter a consistência da pré-forma.

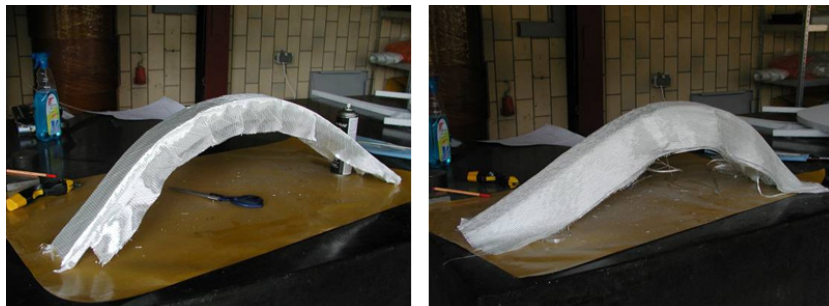


Figura 5.12: Produção da pré-forma

A pré-forma foi então colocada no molde. Os canais rápidos foram colocados paralelamente aos bordos do componente. o canal de entrada foi coberto pelas fibras de reforço. O canal de saída estava separado das fibras de reforço por meio de véu de superfície, de modo a conseguir uma banda de desaceleração. Finalmente, foi feito o saco de vácuo e procedeu-se à infusão da resina.



Figura 5.13: Infusão da pele exterior e do núcleo

Depois da cura da resina e da remoção do saco de vácuo, foi feito um novo laminado por cima do trabalho anterior, ou seja, a pele interior. Foram aí embebidas duas fibras ópticas entre a 7ª e a 8ª camada. Foi preparado um novo saco de vácuo e feita nova infusão.



Figura 5.14: Infusão da pele interior

Depois de curada a resina, o canto de pilar foi cuidadosamente desmoldado por forma a não danificar as fibras ópticas e foi empacotado para expedição.

5.4 Protótipos instrumentados

Construímos e ensaiamos alguns protótipos em conjunto com a Fibersensing, por forma a estudarmos e desenvolvermos métodos para embeber fibras ópticas na estrutura do auto-carro. As fibras ópticas deveriam ser usadas em ambiente industrial e no processo produtivo



Figura 5.15: Canto do pilar

adoptado (RTM), e sobreviver a eventos tão violentos como um capotamento, permitindo a monitorização da estrutura nessas condições.

Uma grelha de Bragg (Bragg grating) é uma micro-estrutura com menos de 10 mm de comprimento e $125\mu\text{m}$ de diâmetro, que pode ser foto-impressa em fibras ópticas foto-sensíveis por exposição lateral a radiação laser ultra-violeta. Tal micro-estrutura consiste numa modulação periódica do índice refractivo do núcleo da fibra óptica, que se caracteriza por uma ressonância de reflexão espectral de banda estreita. Dado que está profundamente embebido na estrutura da fibra óptica, o comportamento de ressonância segue estritamente as acções externas exacta na mesma proporção que a matriz de sílica. Torna-se assim um sensor localizado, de elevada sensibilidade à temperatura e à deformação.

No entanto, a concepção estrutural e os processos produtivos são afectados pela inclusão de fibras ópticas. Por outro lado, as próprias fibras ópticas também impõem requisitos e restrições às soluções construtivas e produtivas. O diâmetro das fibras ópticas é uma ordem de grandeza maior que o de uma fibra de reforço. Num ambiente unidireccional, onde tanto a fibra óptica como o reforço estão perfeitamente alinhadas, os problemas podem ocorrer nas zonas ricas em resina que envolvem a fibra óptica. Estas zonas tendem a encurralar o ar e os vazios. Além disso a matriz é frágil. Por outras palavras, estas zonas são ideais para incubar problemas de fractura. Estes problemas não são tão significativos em tracção na direcção das fibras. No entanto, o cenário muda drasticamente quando o carregamento impõe efeitos transversos (encurvadura, flexão, corte), ou em situações de impacto. Infelizmente, estes são os tipos de carregamento mais importantes.

Além disso, o cenário teórico raramente acontece. À escala da secção da fibra, o desalinhamento constitui a regra, mesmo quando a orientação é garantida por processos de deposição automática. Outro aspecto importante é o facto de os tecidos unidireccionais serem feitos de fios – constituídos por um grande número de fibras –, com um diâmetro total algumas ordens de grandeza maiores que o diâmetro da fibra óptica. As fibras desses filamentos tendem a manter-se agrupadas, tornando mais difícil o alinhamento das fibras ópticas.

No âmbito do LiteBus, foi feito trabalho conjunto com a Fibersensing. Foram feitas várias amostras de placas com fibras ópticas embebidas por forma a afinar os detalhes de processo, com vista a uma futura utilização de sensores de Bragg na monitorização de ensaios de protótipos de secções de autocarro em ensaios estáticos e dinâmicos. As primeiras placas mostraram que as linhas usadas na cosimento dos “tecidos” unidireccionais tornavam impracticável a utilização das fibras ópticas.

Os tecidos de gramagem média ou elevada, sem nenhuma interface com a fibra óptica, estão também fora de questão. Apenas os tecidos de gramagem e padrão muito pequeno permitem resultados aceitáveis.

Numa segunda tentativa de utilização de fibras unidireccionais, foi tentado o enrolamento filamental (manual) por forma a evitar as linhas de cosimento. Os resultados foram muito melhores, mas – num processo industrial – a colocação da fibra óptica, em especial a entrada e a saída, não tinha sido ainda conseguido de forma eficiente.

Foi dada prioridade aos processos de injeção, por ser esse o processo escolhido para a produção dos pilares do LiteBus. Foi então feito um pilar por RTM. Ainda na fase de construção, o modelo do canto foi usado como molde para a produção de uma placa. Tanto esta como o pilar deverão ser ensaiados à abertura e ao fecho. O INEGI e FiberSensing concordaram que as principais conclusões destas tentativas iniciais são:

1. A qualidade do sinal de medição é significativamente melhorado quando as fibras ópticas, e em especial os sensores de Bragg, estão colocados entre duas camadas de véu de superfície. Terão ainda que ser verificadas a influência do véu de superfície na medição (propriedades mecânicas locais) e a necessidade de ancorar a fibrar por forma a evitar o deslizamento da mesma;
2. Seja qual for o processo escolhido, a entrada e a saída da fibra óptica são aspectos críticos. Terão que ser desenvolvidos componentes específicos para proteger essas zonas críticas. Tal componente deve permitir o livre assentamento da fibra durante o fecho do molde, permanecer totalmente integrado no pilar e permitir o acesso para ligação dos terminais;
3. Ficou provado que a colocação da fibra de reforço interfere como o posicionamento da fibra óptica. Isto poderá ser ainda mais grave num processo industrial de RTM. Uma das soluções apontadas será a produção de uma banda de resina reforçada com veu de superfície contendo as fibras ópticas em bebidas correctamente alinhadas, que será posteriormente posicionada no meio das fibras de reforço no interior do molde ou numa eventual pré-forma;
4. O recurso à multiplexagem de sensores FBG no ensaio de capotamento, proporcionará um número mais elevado de pontos medição, permitindo uma melhor compreensão dos modos de rotura do material e do comportamento de colapso da estrutura;

- Integração de um sistema nervoso baseado em sensores FBG embebidos na estrutura da secção de autocarro fornecerá os meios necessários à monitorização da saúde estrutural durante toda a vida útil do veículo e para aumentar a sua segurança.

No entanto, a arquitectura do sistema deverá resultar na redundância em caso de corte de fibras ou problemas na interface. A FIBERSENSING tinha já efectuado um estudo preliminar à arquitectura do sistema nervoso, bem como à correspondente unidade de interrogação. A Figura 5.16 apresenta a referida arquitectura incluindo 240 sensores de deformação embebidos em seis fibras.

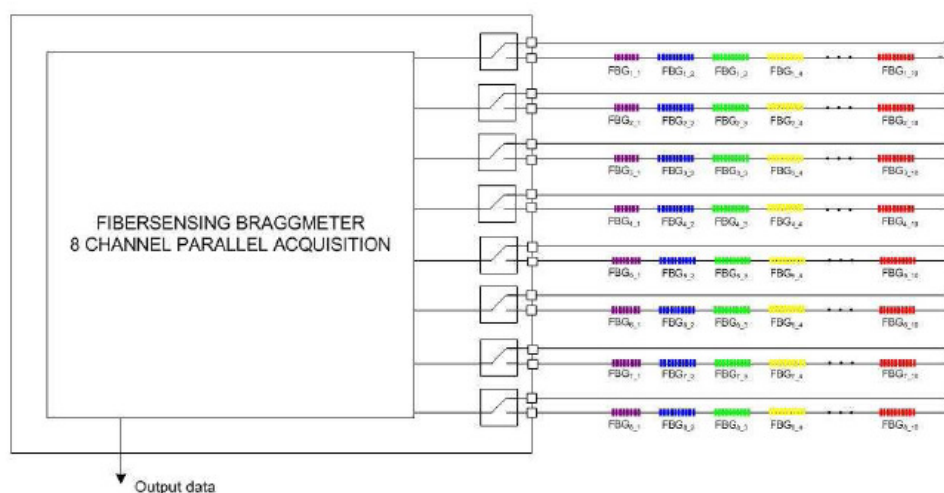


Figura 5.16: Arquitectura do sistema nervoso

Nota: 30 sensores em cada fibra e redundância em caso de fractura da fibra

Nesta arquitectura, cada fibra deve ser embebida no laminado e pode-se multiplexar até trinta sensores de deformação. Cada uma destas fibras embebidas deve ser encaminhada ao longo do componente, garantindo que ambas as extremidades ficam acessíveis à unidade de interrogação. Esta unidade tem dois conectores ópticos para cada fibra optica permitindo que a matriz de sensores seja interrogada de ambos os lados. Desta forma, fica assegurada a redundância para os casos de rotura da fibra, do conector ou do *splice*, aumentando a fiabilidade do sistema.

Os sensores de deformação podem ser directamente embebidos no laminado. Está em estudo a possibilidade de os embeber na interface núcleo/pele.

Os sensores de temperatura também podem ser embebidos, mas são necessárias modificações, uma vez que os FBG são altamente sensíveis tanto à temperatura como à deformação, devendo esta componente ser anulada. Estes sensores têm que ser concebidos e produzidos com cuidado por forma a anular os efeitos induzidos pela deformação na sua reposta. Isto é

feito inserindo o FBG num tubo capilar de aço inoxidável. A Figura 5.29 mostra um sensor de temperatura pronto a ser embebido

5.4.1 Primeiras tentativas

A Figura 5.17 mostra as fibras ópticas já na posição desejada. Como se pode observar foi colocada uma camada de véu de superfície (manta aleatória de fibra de vidro muito fina, sem dignidade estrutural) de cada lado da fibra óptica numa das metades do seu percurso ao longo do componente. Na zona do FBG e sua vizinhança foi adicionado mais uma camada de véu em ambos os lados. A sequência de empilhamento é sempre simétrica em relação à superfície onde estão as fibras ópticas. Na outra metade do percurso, não foi colocado véu, ficando as fibras ópticas embebidas entre duas camadas de manta aleatória de fibra de vidro; estas sim, com valor estrutural. Os sinais foram lidos em ambas as extremidades de cada fibra óptica para avaliar o efeito dos dois tipos de percurso.



Figura 5.17: Posicionamento da fibra óptica

Depois de completa o empilhamento das fibras de reforço, foi acabada a produção do provete por RTM, usando um pote pressurizado. Foram feitas interrogações aos sensores durante a injeção e deixou-se curar sem acompanhamento. Fizeram-se novas interrogações antes de desmoldar.

Na Figura 5.18 vemos o provete desmoldado, mantido no contra-molde para proteger as fibras ópticas. De facto, a saída desta fibras, do laminado, é o ponto crítico para a sua sobrevivência.



Figura 5.18: Provete curvo com fibras ópticas

A Fibersensing analisou as medições e concluiu que a manta aleatória estrutural no percurso da fibra óptica, mas afastada dos FBG, permite um bom desempenho dos sensores. Nas Figuras 5.19 e 5.20, são mostradas as comparações das leituras em ambos os extremos de uma fibra com dois FBGs. Neste caso, a extremidade direita é a que sai da parte do percurso com véu de superfície.

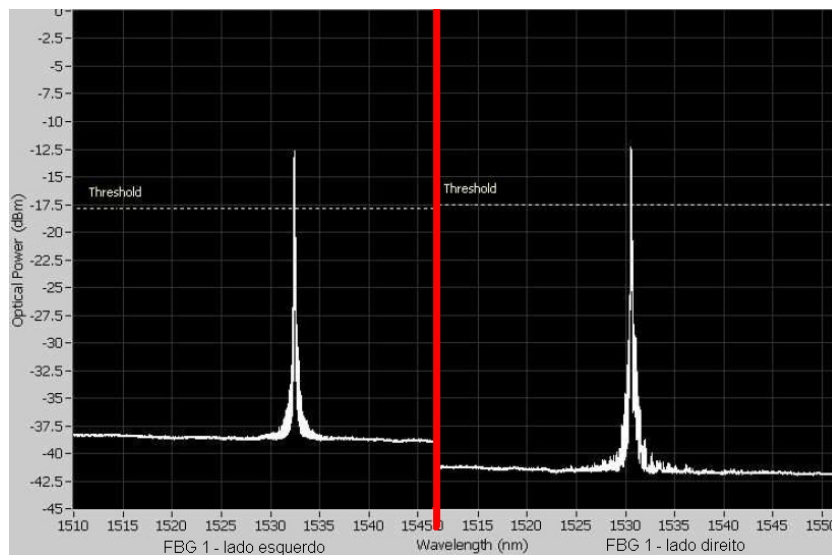


Figura 5.19: FBG-1

Após discussão do trabalho realizado concluímos que é obrigatório embeber o FBG (e parte da fibra óptica na sua vizinhança) em véu de superfície. No restante percurso, o véu torna-se menos forçoso, mas é obrigatório embeber em manta aleatória estrutural, para que sirva

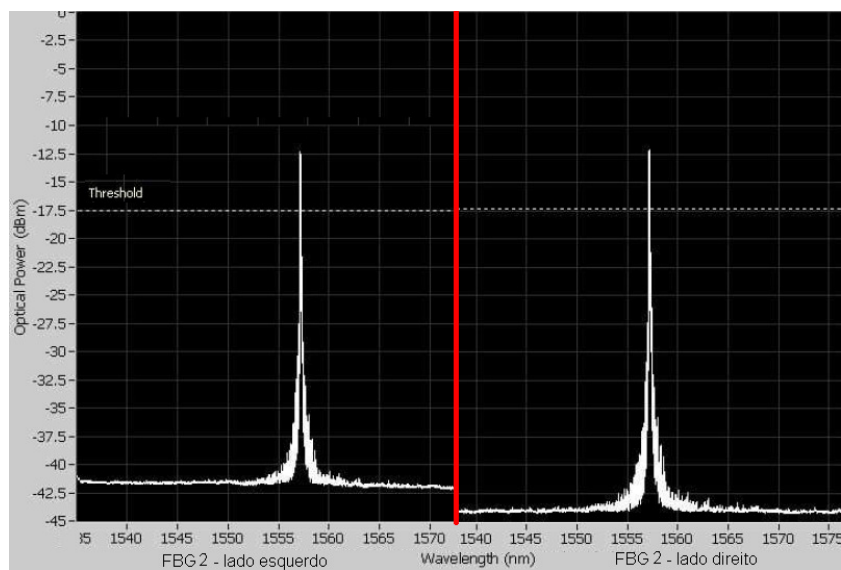


Figura 5.20: FBG-2

de interface com fibras com outras configurações.

Uma questão permanecia sem resposta e os provetes e ensaios seguintes serão aproveitados para lhe dar resposta: é ou não necessário ancorar as fibras ópticas? Outro aspecto a melhorar é a entrada e saída das fibras ópticas no laminado. Uma primeira solução proposta por nós está mostrada na Figura 5.21.

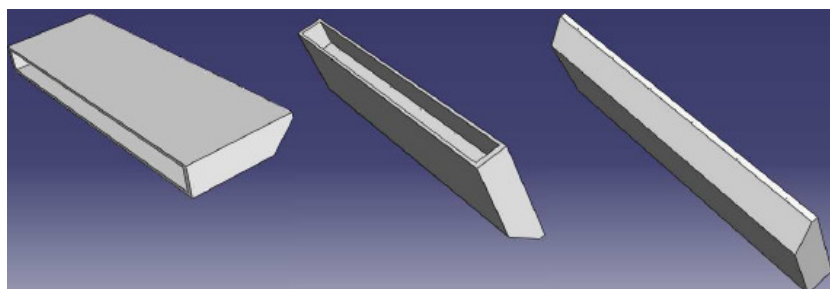


Figura 5.21: Entrada de fibras ópticas

Esta entrada deve permitir o fecho hermético do molde, o posicionamento correcto mas livre das fibras ópticas e o acesso às extremidades para ligação à unidade de interrogação. A Figura 5.22 permitem perceber o conceito deste acessório.

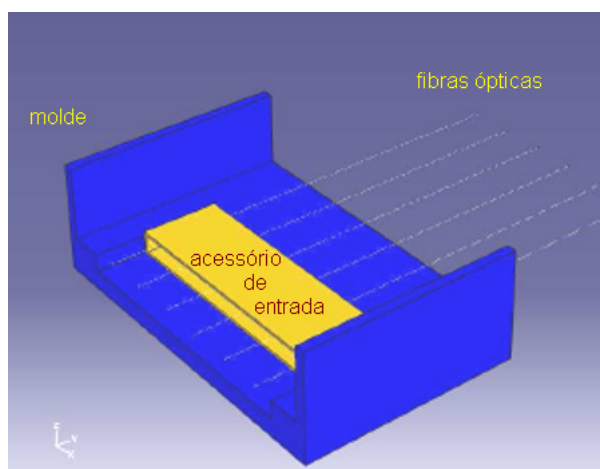


Figura 5.22: Entrada posicionada

5.4.2 Pilar recto

Após a estadia em Clausthal, e já no INEGI, construimos um molde em laminado compósito, usando o modelo que foi produzido na TU Clausthal, com a Sonja Niemeyer. O molde foi então usado para produzir um pilar recto na zona dos envidraçados (secção transversal menor).



Figura 5.23: Pilar concluído

Neste pilar foram embebidas à superfície duas fibras ópticas, cada uma delas com 4 sensores FBG. As fibras foram dispostas paralelamente, de forma a que os FBG ficassem em posições aproximadamente iguais relativamente ao comprimento da viga. As posições aproximadas são esquematizadas na Figura 5.24.

Os detalhes mostrados na Figura 5.25, realçam o cuidado de aproximar tanto quanto possível

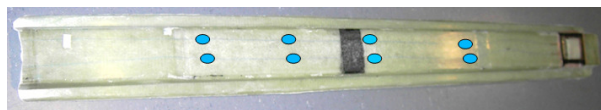


Figura 5.24: Posição dos FBG

os FBG das zonas mais críticas - de transição de secção recta e da área de carregamento do apoio central. Deve notar-se que a transição de secções foi amenizada, dado que as fibras ópticas não sobreviveriam se forçadas a acompanhar a geometria original, e o detalhe do reforço local para o apoio central em tecido de fibras de carbono.

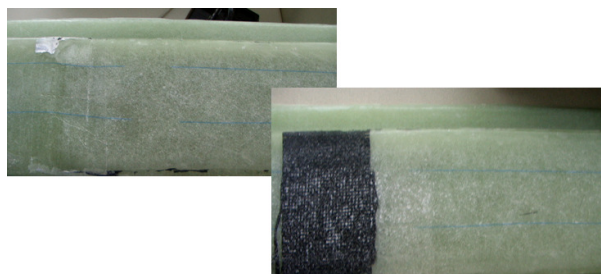


Figura 5.25: Proximidade das zonas críticas

Um sucesso importante conseguido neste protótipo foi a sobrevivência das fibras ópticas ao (potencialmente violento) processo de desmoldação. Não foi totalmente perfeito, uma vez que uma quantidade mínima fluiu pelos capilares e foi suficiente para colar as fibras enroladas. Cuidados adicionais de isolamento permitirão uma solução capaz para este problema, que foi identificado como sendo o mais difícil.



Figura 5.26: Entrada das fibras ópticas

Antes e depois dos ensaios mecânicos, foram registadas as respostas espectrais para posterior comparação.

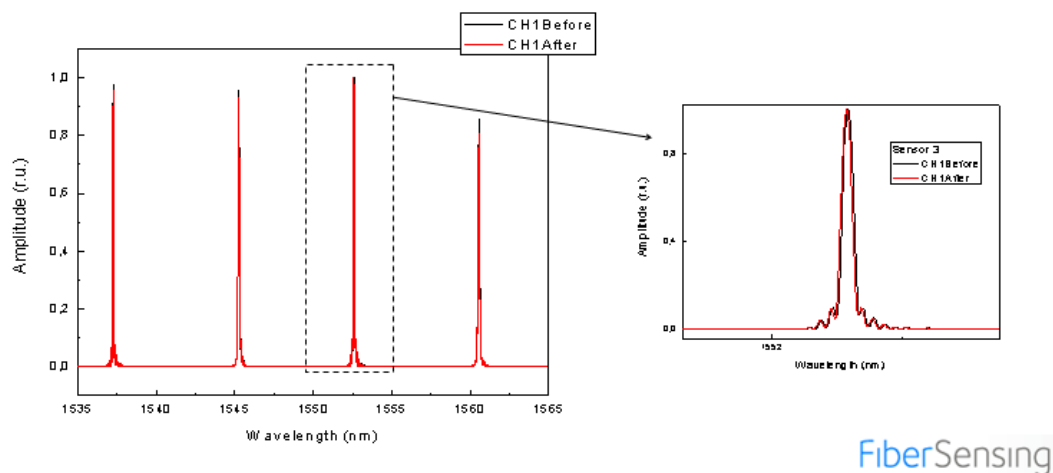


Figura 5.27: Respostas espectrais do canal 1

Nota: fibra esquerda vista por um observador posicionado de frente para o pilar e próximo da entrada das OF no componente

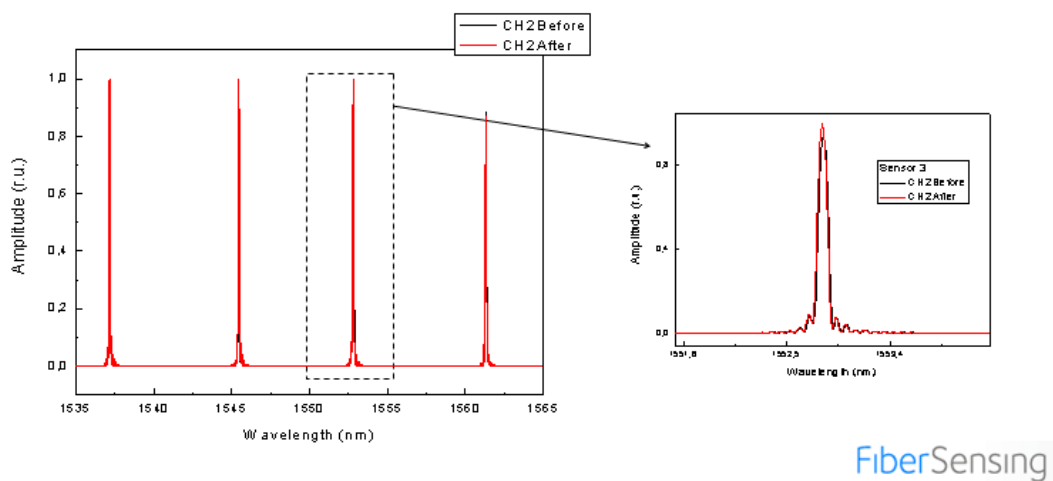


Figura 5.28: Respostas espectrais do canal 2

Ao longo do ensaio foram registadas as deformações verificadas. Da sua análise concluiu-se que não houve escorregamento de fibras. Registou-se apenas uma diferença máxima de 0.6% entre as deformações medidas, embora fosse clara uma tendência de recuperação. As

leituras são similares, de acordo com as expectativas relativas a fibras paralelas e próximas. A intabilidade de carga na paragem e inversão da carga, foi igualmente registada por cada par de sensores. Para efeitos estáticos, o processo usado foi considerado válido. Como trabalho futuro, ficou acordado que se avançaria para a correlação das interrogações feitas aos FBG com os resultados dos modelos numéricos, a validação das Of em carregamentos dinâmicos e a produção de provetes com sensores de temperatura para determinação do perfil de temperatura ao longo da espessura da estrutura sanduíche. As medições de temperatura serão feitas a três níveis: superfície exterior do laminado, na interface laminado/núcleo e no interior centro do núcleo. A Fibersensing já apresentou na reunião de Barcelona, a concepção do sensor de temperatura (Figura 5.29).

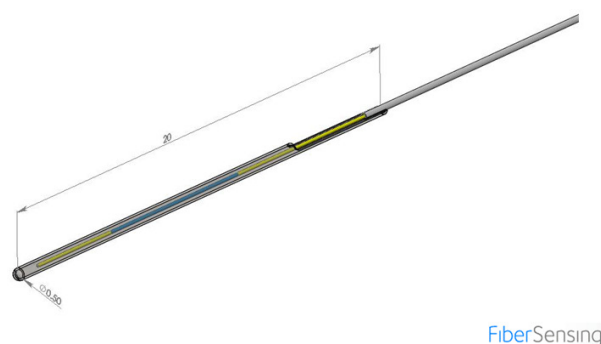


Figura 5.29: Sensor de temperatura

5.5 Bibliografia

- 1 Neves, Paulo, Relatório FEUP-Bus, DEMEGI, 2006.
- 2 Mathias Kliem e Neves, Paulo, Relatório do estágio Leonardo da Vince – (FEUP-Bus), INEGI, 2006.
- 3 Edited by J. M. López-Higuera, Handbook of Optical Fibre Sensing Technology, John Wiley & Sons, Chichester, 2002.
- 4 J.C. Garrido, M. Frövel, F. Cagrerizo and J.M. Pintado, "Influencia de fibras ópticas embebidas sobre las propiedades mecánicas de un material compuesto", MATCOMP'07, pp 3-11, Valladolid, September 2007.
- 5 M. Frövel and J.M. Pintado, "Validación de la durabilidad de sensores ópticos y sus interfaces embebidos en laminados carbono/epoxy", MATCOMP'07, pp 115-123, Valladolid, September 2007.

Página intencionalmente em branco

CAPÍTULO 6

Ensaaios experimentais realizados

6.1 Ensaio à flexão em três pontos

6.1.1 Pilar FEUPBus

O pilar foi ensaiado no INEGI. Para esse efeito foi utilizada a máquina de ensaios universal electromecânica INSTRON 4208, com uma célula de carga de 100kN. Dadas as dimensões do provete, o ensaio de flexão em três pontos não foi feito segundo uma norma específica. Foi no entanto considerada a norma ASTM C393.

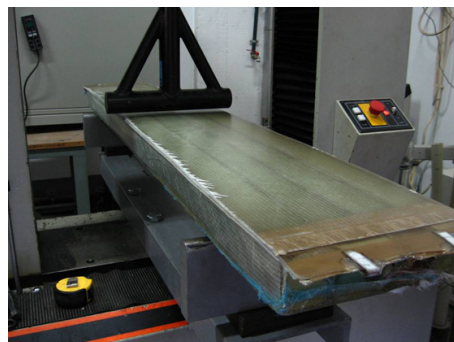


Figura 6.1: Pilar colocado na amarra

Na Figura 6.2, é visível a delaminação da pele exterior, exactamente na interface com o núcleo e delaminações internas na pele, no lado direito. A deformação do bordo é apenas aparente dado que o que vemos é uma camada não estrutural a separar-se da fita de alumínio (facilmente desmoldante). Foi através desta camada que ocorreu o escoamento

de saída de resina da pele superior, voltada para baixo na figura, durante a produção do componente.

Na Figura 6.3, além da delaminação na interface vêm-se também delaminações internas.



Figura 6.2: Pormenor do dano

De notar que o dano nas fibras superficiais a 45° na pele superior aconteceu acidentalmente na operação de maquinagem dos bordos do pilar.

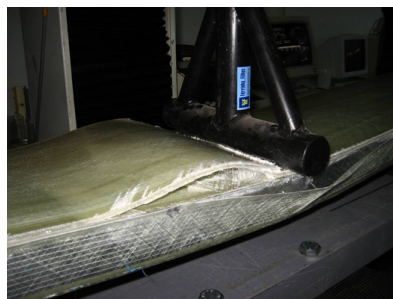


Figura 6.3: Pormenor do dano

Na Figura 6.4, vista do lado oposto, dada a ausência de fita de alumínio e lâmina de saída, torna-se visível o dano no núcleo e, em parte, a rotura da pele.



Figura 6.4: Pormenor do dano no final do ensaio

Na Figura 6.5, podemos ver o dano por encurvadura na pele superior e é perceptível, dado que a pele é translúcida, a zona de delaminação da interface núcleo/pele superior.

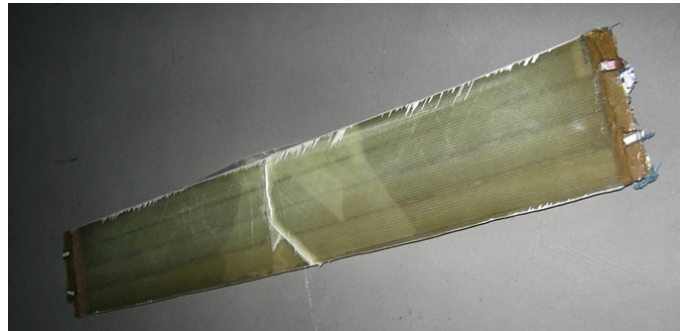


Figura 6.5: Pormenor do dano após ensaio

A carga máxima foi de 64,14kN para um deslocamento de 44,1mm.

6.1.2 Pilar LiteBus

Foram realizados ensaios de flexão em três pontos dos exemplares produzidos. Na Figura 6.8 vemos o ensaio em três pontos do canto do pilar e do pilar recto (zona da janela).

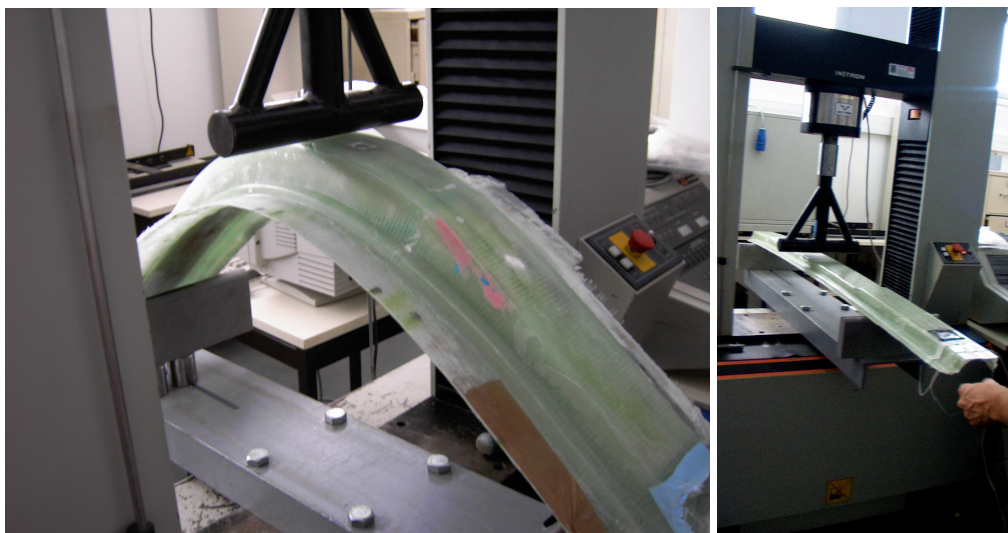


Figura 6.6: Ensaio de flexão em 3 pontos dos dois provetes do pilar

6.2 Ensaio de flexão de pilares rectos

Foram feitos os seguintes ensaios, com a colaboração do INSIA:

Tabela 6.1: Ensaios realizados

Pilar	Nota	Ensaio	$F_{máx}$ (N)	$d_{máx}$ (mm)
Clausthal 1	"voador"	Clausthal 1-1	447	581
Clausthal 1		Clausthal 1-2	400.33	778.23
Clausthal 1	(Recarga)	Clausthal 1-3	127.51	698.15
Clausthal 3		Clausthal 3-1	700.86	625.6
Clausthal 3		Clausthal 3-2		
Clausthal 5	Flexão 3 pontos (anterior)	Clausthal 5-1		
Clausthal 5		Clausthal 5-2	201.9	667.48
INEGI 1	Instrumentado – a fechar (Fio partido)	INEGI 1-1	610.9	465.6
INEGI 1	Instrumentado – a fechar	INEGI 1-2	614	546
INEGI 1	a abrir	INEGI 1-3	960	541.89

Ensaio Clausthal1-1 – O pilar 1 feito na TU Clausthal foi ensaiado a fechar (no sentido em que o canto adjacente se fecharia). O pilar foi colocado numa amarra constituída por dois roletes. Ao ser ensaiada, a soldadura do bocal de amarração do cabo tractor fracturou. O pilar escorregou e foi projectado a alguns metros.



Figura 6.7: Ensaios realizados

Clausthal1-2 - O mesmo pilar foi então encastrado e repetiu-se o ensaio, após reparar a amarração do cabo tractor.



Figura 6.8: Ensaio realizado

No final deste ensaio, o pilar foi descarregado. Posteriormente, foi feita a recarga do pilar (*Ensaio Clausthal1-3*). O resultado final está mostrado na Figura 6.9.



Figura 6.9: Ensaio realizado

Clausthal3-1 - O pilar 3 feito na TU Clausthal foi ensaiado a abrir. A montagem de ensaio e a fractura final são mostradas na Figura 6.10.

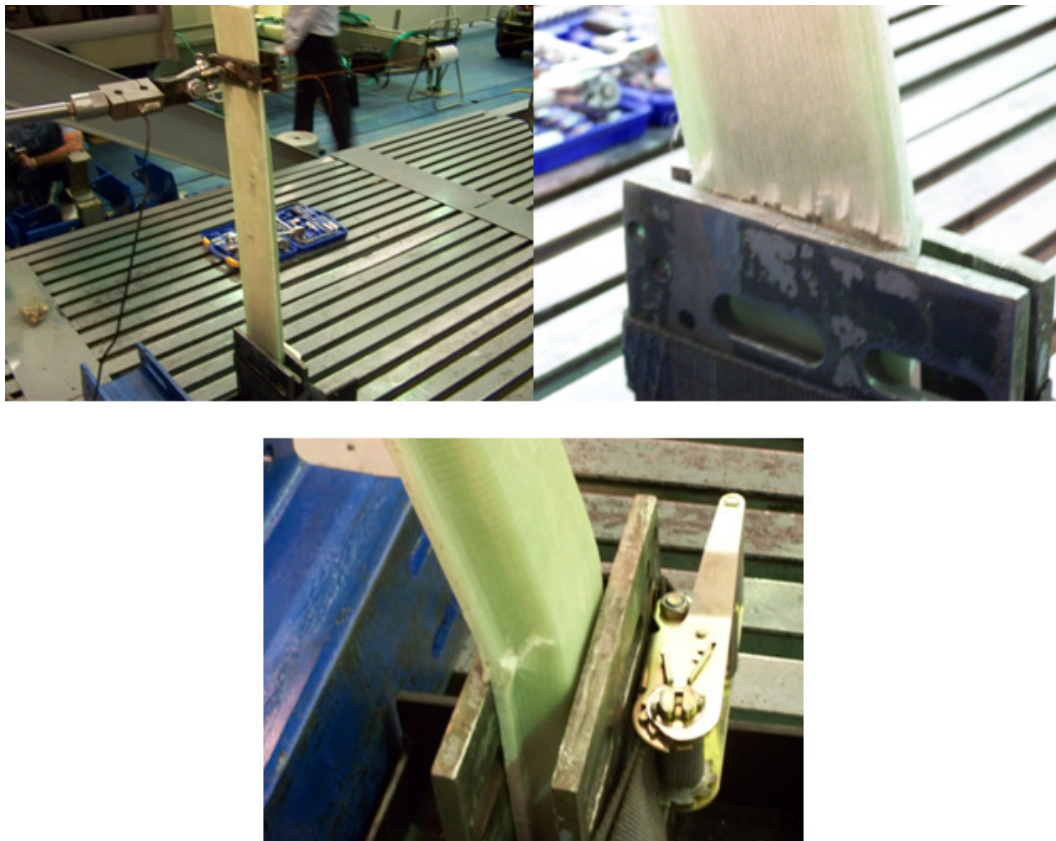


Figura 6.10: Ensaios realizados

Clausthal5-2 - O pilar 5 feito na TU Clausthal já tinha sido anteriormente ensaiado na UPM, à flexão em três pontos(*Ensaio Clausthal5-1*). Os resultados já tinham sido apresentados em Barcelona, mas voltou-se a ensaiar para avaliar a rigidez que o pilar ainda retinha.

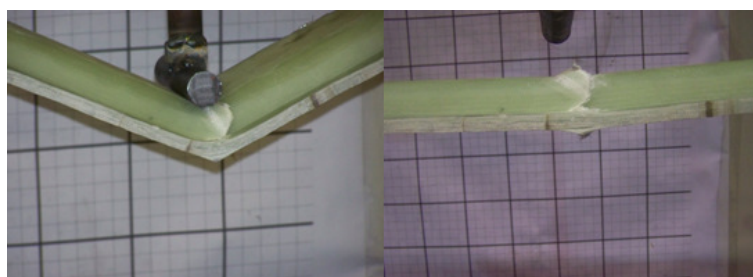


Figura 6.11: Ensaios realizados

INEGI1-1 - O pilar construído no INEGI foi ensaiado no sentido a fechar. Neste primeiro ensaio, foi possível monitorizar por interrogação dos sensores FBG. Na Figura pode ver-se

o detalhe da amarra, onde se vê a explicação para a menor rigidez medida neste ensaio.



Figura 6.12: Ensaio a fechar do pilar feito no INEGI

No final, foi observada uma zona de dano por encurvadura localizada pouco acima do apoio interior (e abaixo dos primeiros gratings)



Figura 6.13: Resultado do ensaio do pilar feito no INEGI

INEGI1-2 e -3 - O mesmo pilar foi ensaiado a abrir. Dado que estava danificado no apoio inferior e dado que o carregamento iria ser feito sobre as fibras ópticas, optou-se por não monitorizar o ensaio e invertê-lo na vertical, encastrando-o na parte sã.



Figura 6.14: Ensaio a abrir do pilar feito no INEGI

6.3 Estudo das secções rectas dos pilares

Depois de ensaiados, os provetes foram cortados para estudar as suas secções rectas. Como podemos observar são grandes as diferenças entre as duas construções. O pilar do INEGI tem mais fibra de reforço mas menor fracção volúmica, pelo que os laminados são mais espessos. Tem ainda uma construção mais regular. No geral, espera-se que seja mais rígido e resistente.



Figura 6.15: Secções na zona dos painéis laterais



Figura 6.16: Secções na zona da janela

Na Figura 6.17 podemos ver o detalhe da secção do pilar na vizinhança da fibra óptica. Um detalhe interessante é a comparação entre as fibras de reforço e a fibra óptica. Embora a superfície esteja mal polida, precebem-se as secções das fibras de reforço (pequenos círculos

brancos) aglomerados na parte inferior. Esta diferença de escala é a razão das grandes dificuldades sentidas quando se tenta embeber fibras ópticas em laminados compósitos.

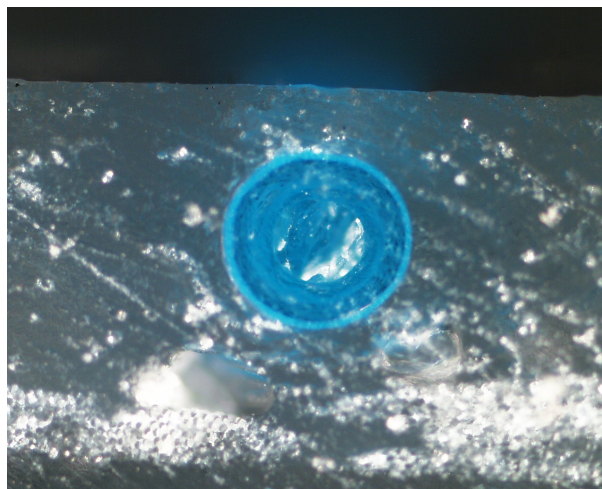


Figura 6.17: Secção da fibra óptica embebida

6.4 Resultados dos ensaios

6.4.1 Ensaio de flexão em três pontos

Os resultados dos ensaios de flexão em três pontos são mostrados nos gráficos das Figuras 6.18 e 6.19. Os ensaios foram feitos para averiguar se existem diferenças ou dispersões relevantes na produção dos vários componentes e para validar os modelos numéricos. Uma primeira tentativa de comparação com os resultados dos ensaios, feitos pelo INEGI e pela TU Clausthal aos respectivos componentes, não foi bem sucedido devido a diferenças na preparação dos ensaios, que não puderam ser repetidos. No gráfico da Figura 6.18 podemos ver a comparação do três ensaios, com diferentes afastamentos entre apoios fixos, feito no INEGI do pilar aí produzido com o ensaio feito pelo INSIA, de um pilar produzido em Clausthal. Com estes resultados calculou-se o valor aparente de rigidez, EI , através da fórmula:

$$EI = \frac{FL^3}{48d}$$

Estes valores deixam perceber uma maior rigidez do pilar do INEGI. Subsiste a dúvida pelo facto de a máquina de ensaio e o método não serem os mesmos. Esse problema foi ultrapassado nos ensaios feitos no INSIA. Nesse trabalho, este presente a FIBERSENSING que monitorizou o pilar instrumentado.

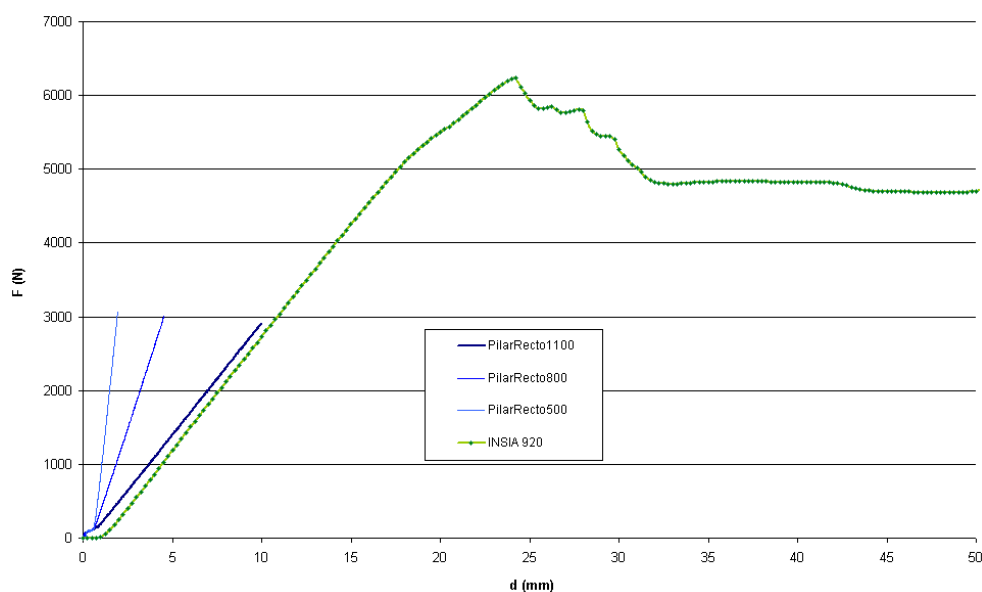


Figura 6.18: Gráfico com as curvas dos ensaios de flexão em três pontos

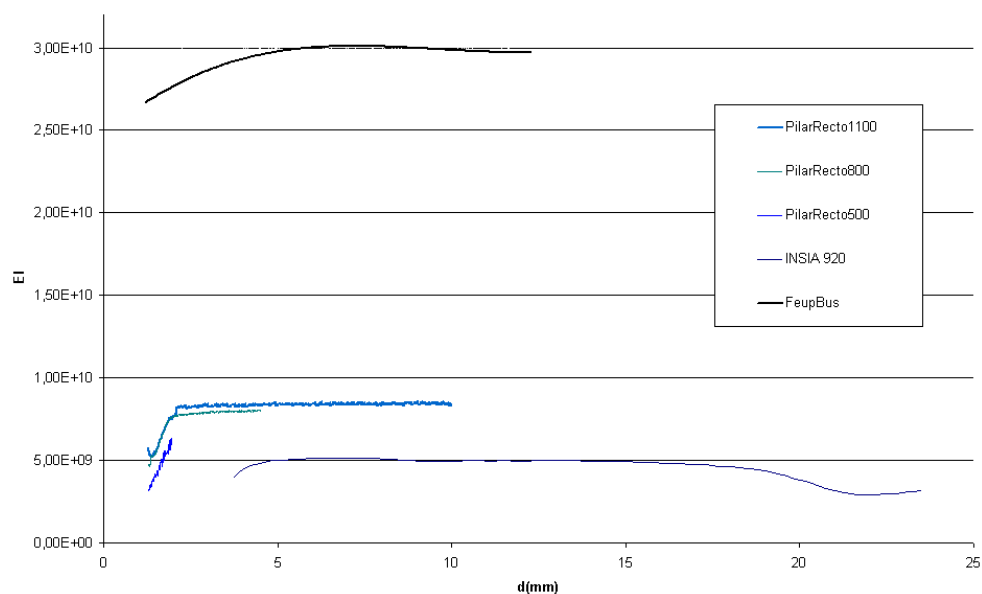


Figura 6.19: Rigidez calculada a partir dos resultados de ensaio

No gráfico da Figura 6.19, é visível a convergência dos valores de rigidez calculados com os resultados de cada um dos ensaios feitos ao pilar do INEGI (afastamentos entre apoios fixos de 500, 800 e 1100mm). A diferença quase-marginal que ainda assim subsiste deve-se aos efeitos de corte, cada vez mais importantes à medida que o afastamento entre apoios

diminui. Foi ainda traçada a curva referente a metade da rigidez calculada apartir dos resultados do ensaio em três pontos do pilar FEUP-Bus. Considerou-se apenas metade porque naquele projecto existiria metade dos pilares e estes seriam a partida duas vezes maiores. Também metade da secção (metade da largura) se aproxima bem da secção do FEUP-Bus. Nota-se que a filosofia adoptada neste projecto pode ser usada para conseguir o aumento de rigidez necessário no LiteBus.

6.4.2 Ensaio de flexão de pilares rectos

O gráfico da Figura 6.20 refere-se aos ensaios do pilar produzido no INEGI. O ensaio do pilar ainda instrumentado. Ao contrário dos pilares feitos em Clausthal nos quais a transição de secção se dá perto da zona de aplicação da carga (menor momento flector), no pilar do INEGI, ela ocorre dentro da amarra e a secção com menor altura não está apoiada no início do ensaio. Resulta daqui uma menor rigidez aparente. Quando a parte mais fina fica totalmente apoiada, já o deslocamento atingiu valores elevados e existe dano extenso, pelo nunca chega a haver aumento significativo de rigidez. O valor assim calculado é enganador e, sem dúvida, inferior ao dos pilares de Clausthal. Depois deste ensaio foi remontado na amarra depois de rodado. Foi então ensaiado no sentido contrário – agora com a pele exterior à tracção – e amarrado pela extremidade onde anteriormente estava aplicada a carga de ensaio, após lhe ser cortada a parte danificada, pelo que não era possível utilizar as fibras ópticas. Foram removidas as pontas e fez-se o ensaio sem monitorização.

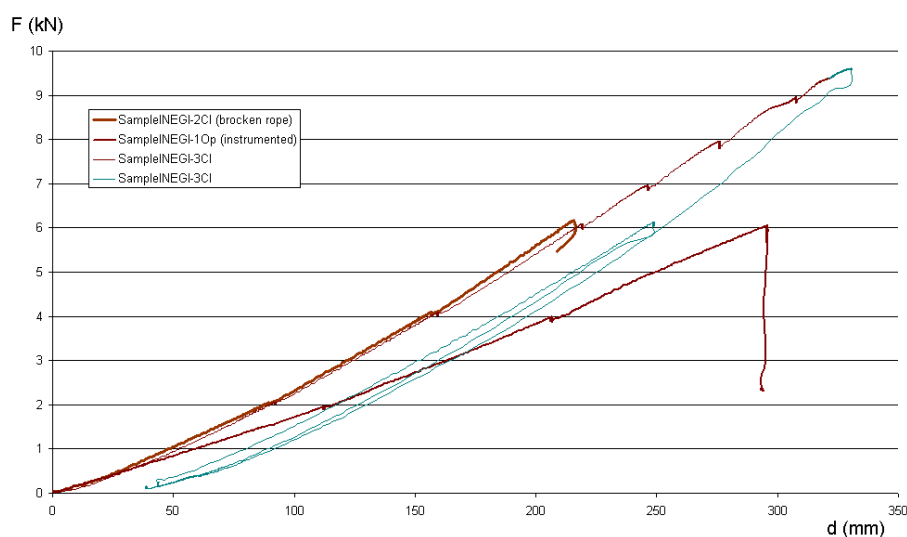


Figura 6.20: Gráfico F–d dos ensaios do pilar INEGI

Numa primeira tentativa de carregamento, o fio que mede o deslocamento durante o ensaio partiu-se. O ensaio foi por isso parado e a montagem foi corrigida. A curva correspondente está identificada como INEGI-2Cl. O ensaio foi depois repetido. A curva é agora a INEGI-3Cl. Praticamente as duas curvas coincidem. Dado o grande deslocamento e a força relevante em causa, decidimos parar o ensaio e descarregar. Após descarga total voltou a carregar-se a 6kN de um só impulso. Como pode ser visto, a rigidez é praticamente a mesma.

No gráfico da Figura 6.21, são apresentados os resultados dos ensaios dos pilares produzidos em Clausthal.

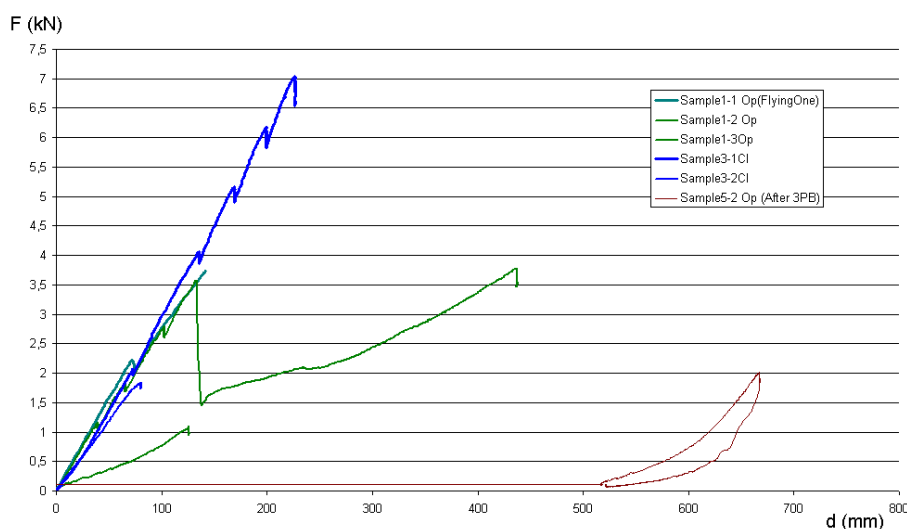


Figura 6.21: Gráfico dos ensaios dos pilares produzidos em Clausthal

Não existe uma diferença significativa de rigidez entre os dois sentidos de carregamento. O mesmo não se passa quanto à resistência, que é claramente maior quando se tracciona a pele exterior.

O ensaio do pilar sample3-1Cl (feito em Clausthal) não é levado à rotura mas percebe-se que apresenta uma resistência pelo menos 80% da do pilar INEGI, nesse sentido de ensaio. No sentido de ensaio oposto, mesmo com os problemas na amarração já expostos, o pilar do INEGI provou ser muito mais resistente. É importante notar que a carga suportada pelos pilares neste sentido nos permitem afirmar que a resistência não é um problema, dado que é apenas um pouco inferior à que deve ser suportada por um anel completo, constituído por dois pilares.

No entanto, a rigidez só pode ser comparada levando o afastamento dos apoios em consi-

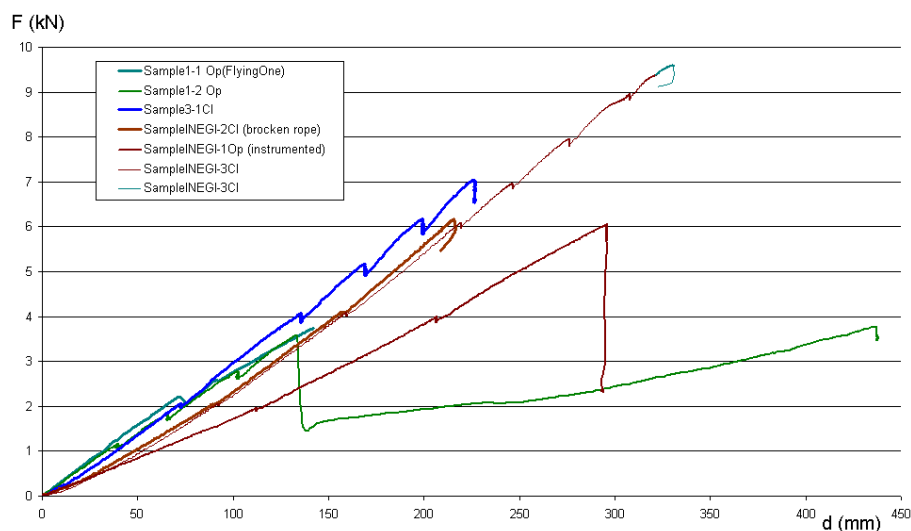


Figura 6.22: Gráfico de comparação das primeiras cargas

deração. Foi usada a fórmula:

$$EI = \frac{FL^3}{3d}$$

Para permitir a utilização da fórmula, foi necessário aproximar os resultados por regressão. O gráfico da Figura 6.23 mostra como foi obtida a curva de regressão para um dos ensaios.

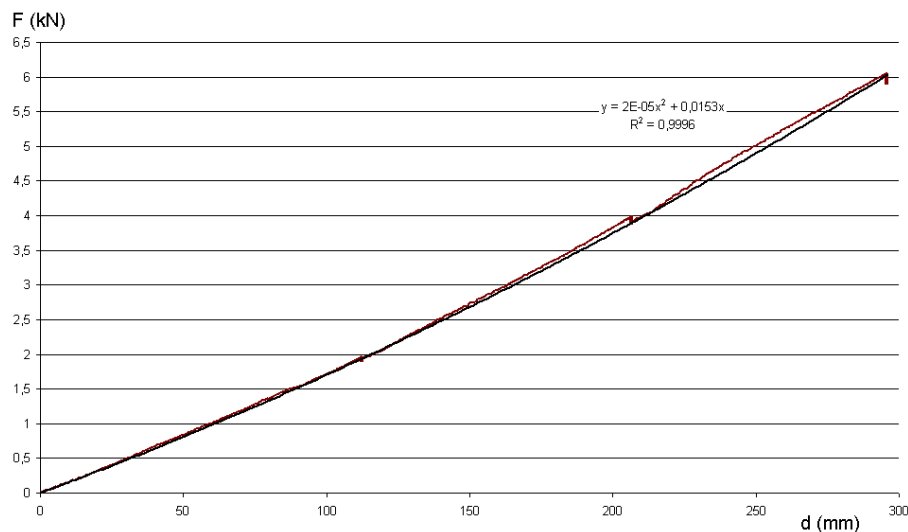


Figura 6.23: Regressão para cálculo da rigidez

Dado que a rigidez avaliada pelo primeiro ensaio do pilar INEGI é falsa, a comparação só

foi feita para os pilares carregados com a pele exterior à tracção. Levando em consideração o que se constatou no ensaio dos pilares construídos em Clausthal, que não existe diferença significativa de rigidez, tal como avaliada nos ensaios realizados em ambos os sentidos de carregamento, podemos dizer que teremos uma boa aproximação da rigidez dos pilares.

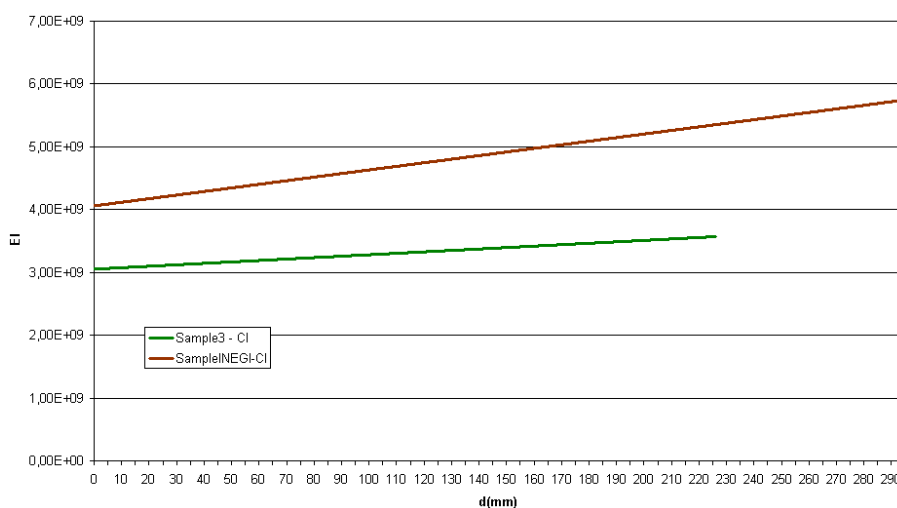


Figura 6.24: Rigidez calculada a partir da tendência

A evolução da rigidez em função do deslocamento pode ser explicada pelos efeitos de não-linearidade geométrica.

6.4.3 Medição de deformação

Ensaio estático

As medições foram feitas no ensaio do pilar INEGI-1 em flexão em três pontos. Como se pode ver na Figura 6.25, os sensores pertencentes a cada um dos pares identificados atrás medem valores de deformação idênticos, o que comprova uma boa qualidade de medição. Como seria de esperar num ensaio de flexão em três pontos, as deformações máximas são medidas no par sensores mais próximos do centro (S3-S7). A diferença máxima entre os valores iniciais e finais dos valores de deformação é de 0.6% da máxima deformação medida, o que nos indica que não há escorregamento das fibras ópticas durante o ensaio.

Na Figura 6.26, é mostrada a resolução conseguida.

Fica assim demonstrada a viabilidade de integração das fibras ópticas no componente e de medição durante ensaio estático.

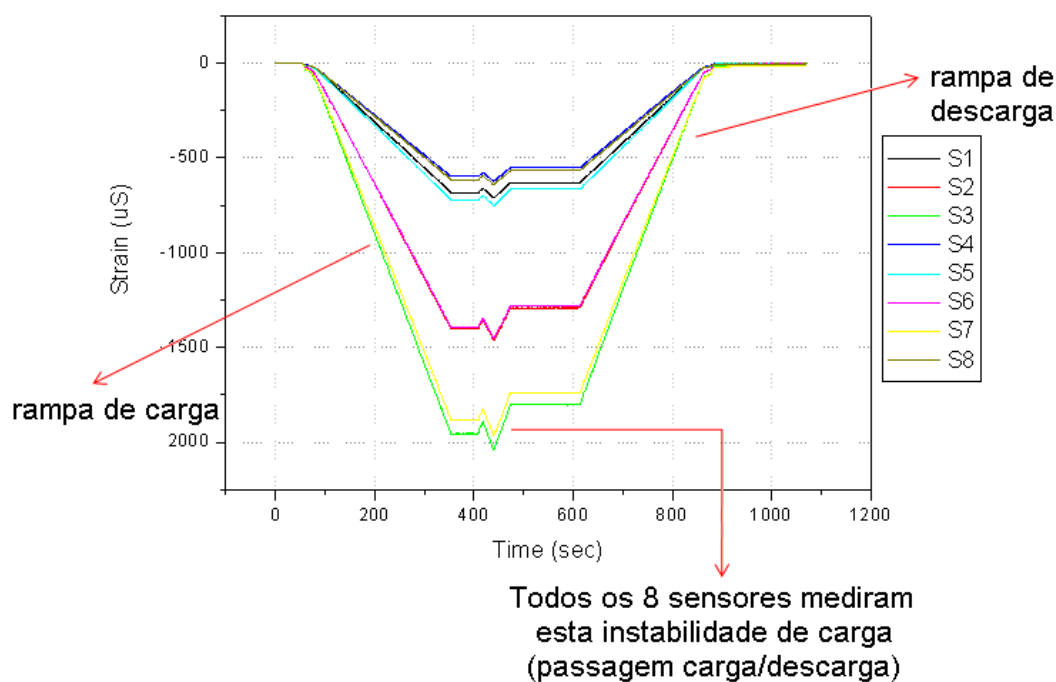


Figura 6.25: Medições do sensor FBG durante o ensaio estático

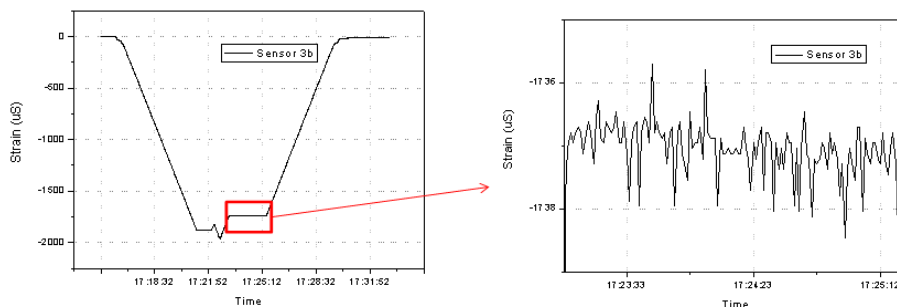


Figura 6.26: Resolução do sensor FBG durante o ensaio estático

Ensaio dinâmico

O mesmo pilar foi ensaiado como viga encastrada e solicitada transversalmente com cargas que variavam em degrau. O valor da carga aumentava quase instantaneamente (a menos da inércia do circuito hidráulico) e com passo de 2kN até aos 6kN, onde se verificou a primeira quebra acentuada de rigidez. A Figura 6.27 mostra o esquema do ensaio.

A Figura 6.28 mostra as medições de carga e deslocamento feitas pelo sistema de ensaio.

As medições de deformação feitas pelos sensores FBG durante o ensaio são mostradas na

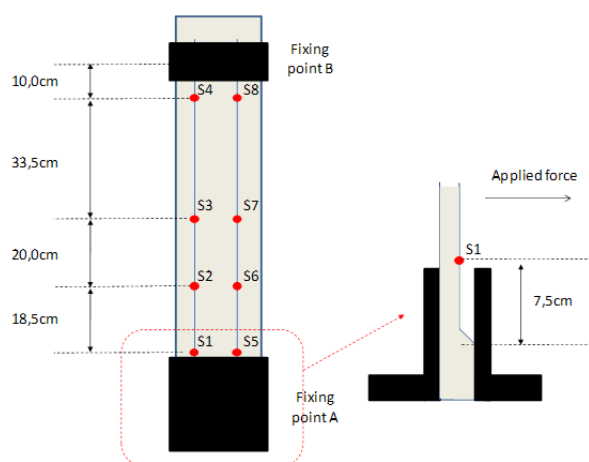


Figura 6.27: Esquema da montagem do ensaio dinâmico

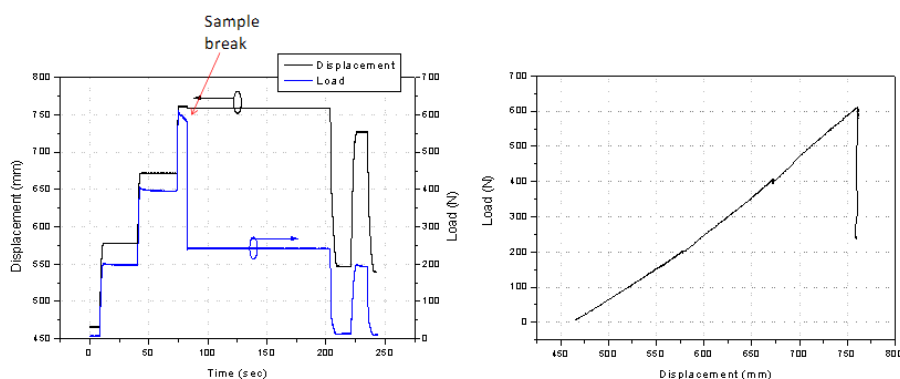


Figura 6.28: Medições de carga e deslocamento durante o ensaio

Nota: no gráfico da direita, a unidade de força é daN

Figura 6.29.

A deformação máxima medida correspondeu aos sensores S5 e S1, como seria de esperar de um ensaio com esta montagem. No entanto, as medições com estes dois sensores são muito diferentes. Isto dever-se-á provavelmente ao facto de os afastamentos à amarra serem ligeiramente diferentes ou a alguma assimetria. Estas observações estão de acordo com as que foram feitas durante o ensaio estático. Os restantes sensores forneceram resultados semelhantes aos do seu par.

O sensor S5 partiu ao atingir uma compressão de $11\text{m}\epsilon$, no mesmo instante em que se dava o primeiro colapso do pilar. A informação dos sensores S1 e S2 deixou de estar disponível durante parte do ensaio devido a uma mudança de comprimento no sensor S1

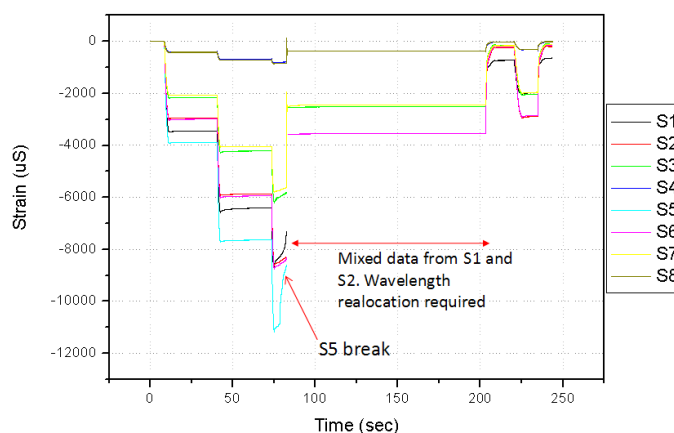


Figura 6.29: Medições de deformação durante o ensaio dinâmico

originada pela sobreposição de espectros, deixando a resposta individual de ser resolúvel. Os sensores não estavam danificados e a sua resposta pode mesmo ser registada numa fase mais tardia do mesmo ensaio. Os problemas impostos pela sobreposição podem ser resolvidos pela atribuição correcta, a cada sensor, da respectiva banda de comprimento de onda.

Os valores finais de deformação sugerem que não houve deslizamento relevante das fibras ópticas durante o ensaio dinâmico. Apenas o sensor S1 apresenta um valor final significativamente diferente do inicial, que denuncia que a zona danificada se alastrou até à sua posição. A Figura 6.30 mostra os gráficos de deformação vs. carga e deformação vs. deslocamento do ensaio do pilar antes do primeiro colapso.

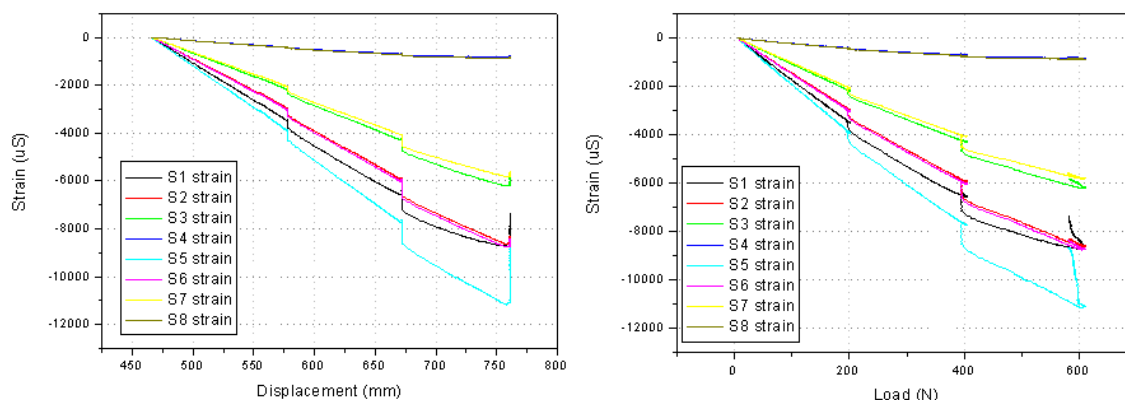


Figura 6.30: Gráficos deformação vs. deslocamento e vs. carga, como medidos pelos sensores

6.4.4 Comparação com pilares em aço

Embora o estudo ainda esteja a ser feito, deixaremos duas comparações entre dois dos pilares acima referidos e um pilar de aço, ensaiados em abertura e fecho. A Figura 6.31 mostra os resultados da comparação do provete Clausthal1 com o pilar de aço.

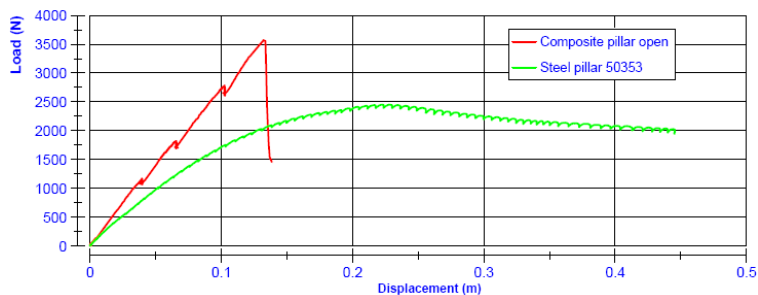


Gráfico F – d

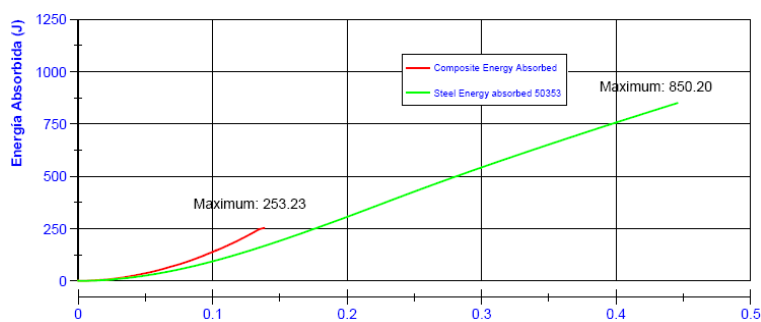
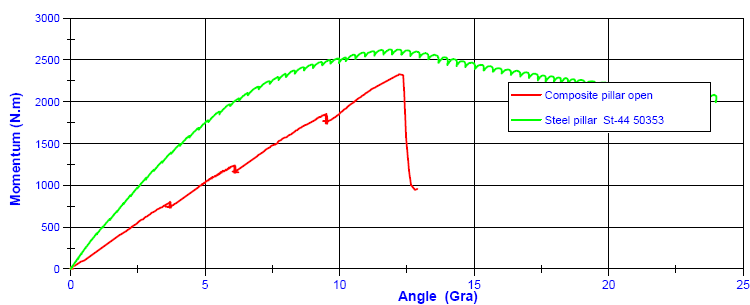
Gráfico $E_{absorvida}$ – dGráfico M – θ

Figura 6.31: Comparação provete Clausthal1 vs. pilar em aço

A Figura 6.32 mostra os resultados da comparação do provete Clausthal3 com o pilar de aço.

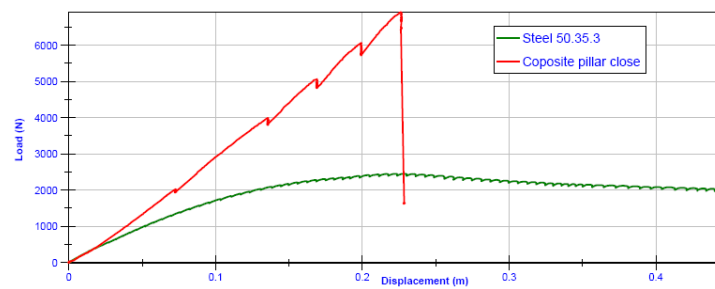


Gráfico F – d

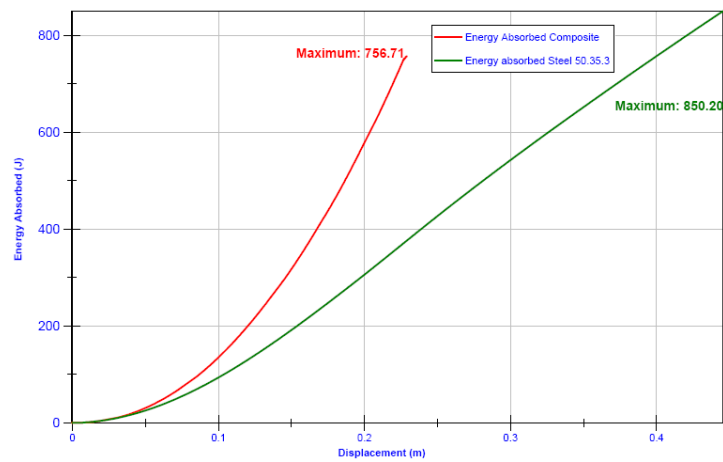
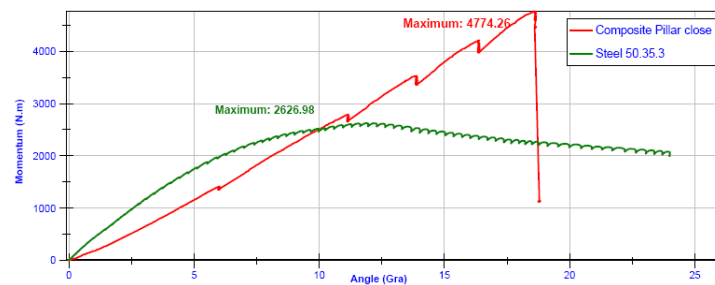
Gráfico $E_{absorvida}$ – dGráfico M – θ

Figura 6.32: Comparação provete Clausthal3 vs. pilar em aço

6.5 Bibliografia

- 1 Neves, Paulo, Relatório FEUP-Bus, DEMEGI, 2006.
- 2 Mathias Kliem e Neves, Paulo, Relatório do estágio Leonardo da Vince – (FEUP-Bus), INEGI, 2006.

Parte IV

Modelos numéricos

CAPÍTULO 7

Modelos iniciais

Os modelos numéricos referem-se à situação de capotamento. Para tal, é feita uma análise quase-estática como método de verificação, definido no anexo 8 do regulamento UNECE R66.

Foram desenvolvidos modelos de elementos finitos (EF) do conceito do veículo, com a arquitetura adoptada, segundo abordagens distintas e feita a selecção do que melhor representa a estrutura. Foram usados os modelos constitutivos dos materiais para calcular os níveis gerais de tensão presentes na estrutura, em condições normais de serviço e para condições de carregamento diferentes.

7.1 Modelos estáticos

Foi recebido um modelo desenvolvido pelo CIMNE [1], que servirá de base de comparação para os modelos a desenvolver no INEGI. O CIMNE desenvolveu modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos para analisar o comportamento estático, dinâmico e modal do corpo do autocarro. Para esse trabalho usaram a geometria do veículo definida pela Italdesign, as propriedades dos materiais definidas pela TU Clausthal. O CIMNE efectuou uma série de análises numéricas, a primeira das quais usando uma primeira proposta de estrutura discutida pelo consórcio.

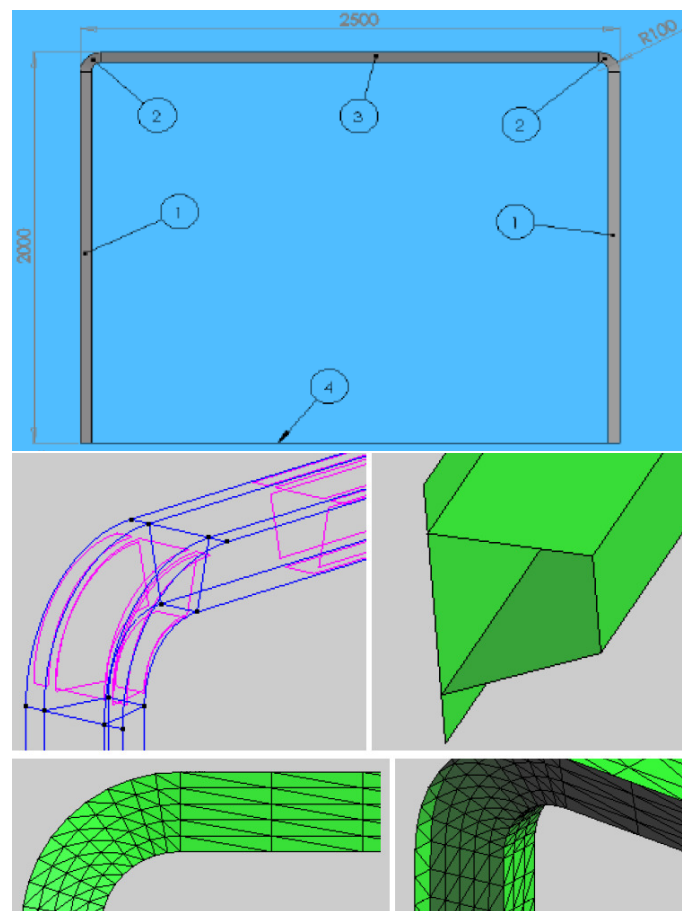
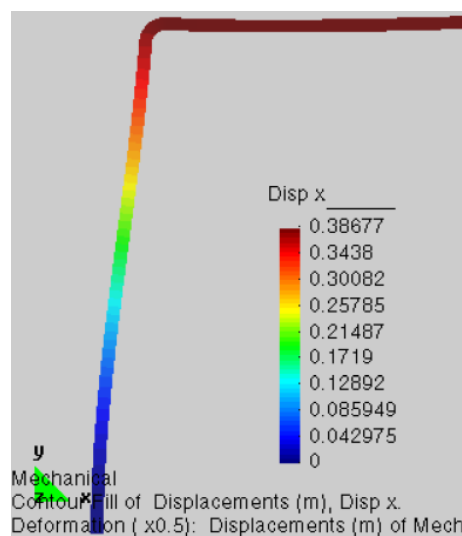


Figura 7.1: Conceito 0 – Estrutura porticada simples e detalhes
Fonte:[1]



Análise	Material	Especificações	Desloc. máx (mm)
lam_frame1	Aço	espessura=4mm	65.00
lam_frame2	Fibra de vidro	[80%_0°,20%_90°]	398.67
lam_frame3	Fibra de vidro	[80%_0°,20%_±45°]	386.77
lam_frame4	Fibra de vidro	[50%_0°,50%_±45°]	495.57
lam_frame5	Fibra de vidro	[70%_0°,30%_±45°]	414.57
lam_frame6	Fibra de carbono (E=238)	[80%_0°,20%_±45°]	159.62
lam_frame7	Fibra de carbono (E=502)	[80%_0°,20%_±45°]	78.60

Figura 7.2: Deslocamentos (Conceito 0 com diferentes configurações materiais)
fonte: [1]

Foram retiradas duas conclusões destes resultados:

1. Os deslocamentos no pórtico em material compósito são maiores do que os verificados num pórtico equivalente em aço, embora os deslocamentos máximos previstos não invadissem a área de segurança dos passageiros.
2. Os compósitos reforçados com fibra de vidro (matriz epoxídica) seriam aceitáveis para satisfazer os requisitos de rigidez da estrutura do autocarro.

O CIMNE efectuou então uma segunda série de análise a um novo conceito desenvolvido pela Italdesign – Vehicle Concept Generation Conceito 1 (versão I). A geometria produzida pela Italdesign e exportada num ficheiro IGES foi posteriormente importada pelo CIMNE utilizando o pré-processador GiD. Dado o detalhe do desenho, existe um número excessivo de linhas e superfícies (Fig. 7.3) tornando a análise bastante complexa e dispendiosa. Por

isso, a primeira tarefa foi diminuir o número de entidades que representam a geometria da estrutura.

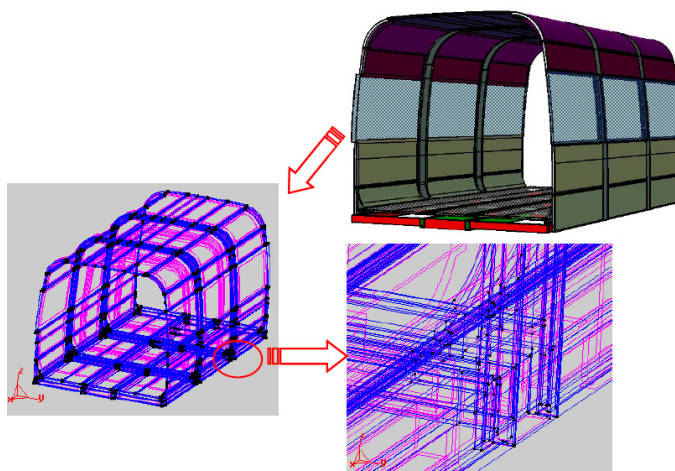


Figura 7.3: Conceito 1 – Geometria importada pelo CIMNE
fonte: [1]

Na análise, consideraram um único pórtico (Pilar em U), em vez da estrutura completa (Figuras 7.4 e 7.5). Neste modelo inicial não foram considerados os painéis laterais. A Figura 7.6 mostra a malha e os conjuntos usados para as definir as condições de fronteira. Os conjuntos usados para os materiais e as orientações das fibras são mostrados na Figura 7.7. Foi aplicada uma carga de 10 kN a um dos cantos superiores do pilar.

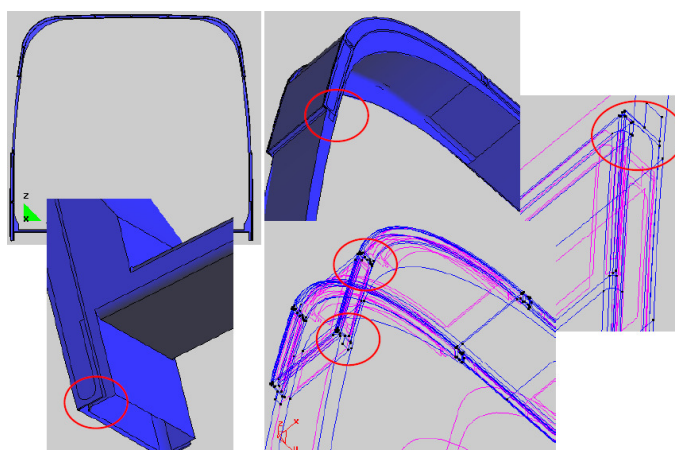


Figura 7.4: Conceito 1 (versão I) – simplificações de geometria
fonte: [1]

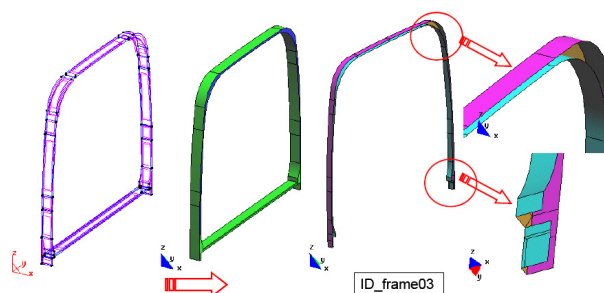


Figura 7.5: Conceito 1 (versão I) – Geometria considerada na análise
fonte: [1]

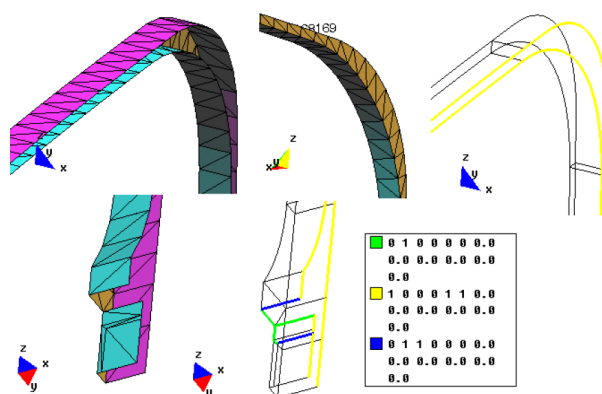


Figura 7.6: Conceito 1 (versão I) – Malha e condições de fronteira
fonte: [1]

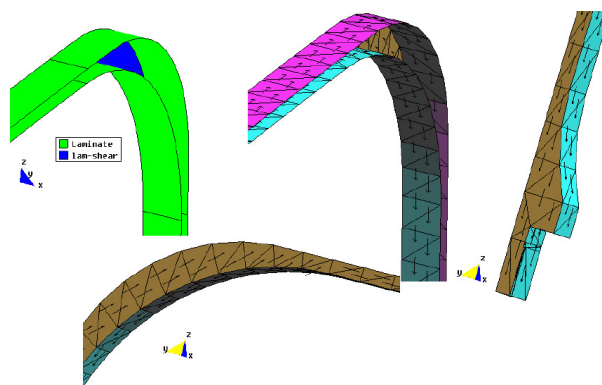


Figura 7.7: Conceito 1 (versão I) – Atribuição de materiais e orientações de fibra
fonte: [1]

Os resultados desta análise podem ser apreciados na Figura 7.8. A comparação, na mesma figura, com o deslocamento verificado em estruturas metálicas actualmente produzidas pela CaetanoBus e estudadas na UPM-INSIA mostra que os pórticos em compósito propostos são mais rígidos e, quando sujeitos a carregamento similar, não invadem a zona de segurança.

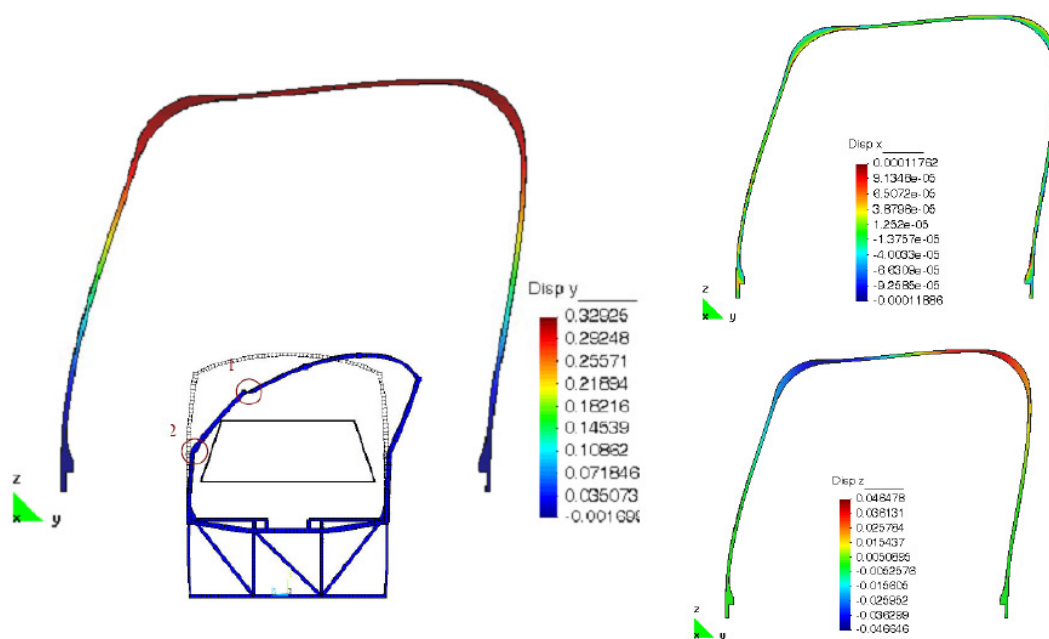


Figura 7.8: Conceito 1 (versão I) – Resultados numéricos (deslocamentos)
fonte: [1]

Foram analisadas várias configurações de material para as secções interior, exterior e lateral para encontrar a mais conveniente, do ponto de vista mecânico. Em todos os casos, consideraram uma fracção volúmica de 50% e uma espessura de parede de 4mm.

Tabela 7.1: Conceito 1 (versão II) – Selecção da configuração de material
fonte: [1]

Análise	pele interior/exterior	pele lateral	Desloc. máx (mm)
ID_lam_frame03_1	[50%_0°,50%_90°]	[50%_0°,50%_30°]	343.11
ID_lam_frame03_2	[80%_0°,20%_±45°]	[80%_0°,20%_±45°]	346.37
ID_lam_frame03_3	[80%_0°,20%_±45°]	[50%_0°,50%_±45°]	336.35
ID_lam_frame03_4	[80%_0°,20%_±45°]	[80%_±45°,20%_0°]	329.25

Após uma redefinição conceptual (após a reunião de Madrid, de 5 a 6 de Junho de 2007), o CIMNE efectuou nova análise numérica usando a nova geometria fornecida pela Italdesign (Vehicle Concept Generation - Concept 1 version II July 2, 2007). Mais uma vez, um único portico foi extraído da estrutura para análise. Os detalhes de geração de malha e das

condições de fronteira são mostrados nas Figuras 7.9 e 7.10.

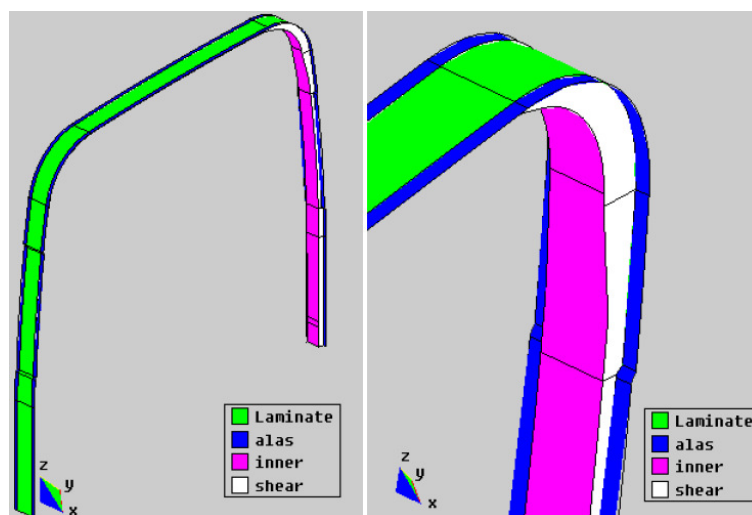


Figura 7.9: Conceito 1 (versão II) – Geometria e materiais considerados na análise
fonte: [1]

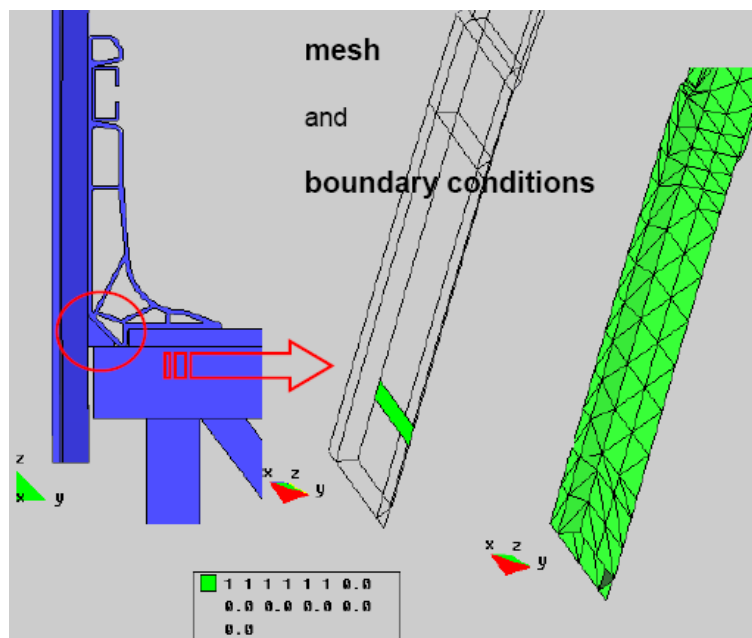


Figura 7.10: Conceito 1 (versão II) – Malha e condições de fronteira consideradas na análise
fonte: [1]

Os materiais adotados foram (ver Figura 7.9):

Tabela 7.2: Conceito 1 (versão II) – Materiais adoptados
fonte: [1]

<i>Material</i>	<i>Espessura</i>	<i>Volume de fibra</i>	<i>Orientações</i>
Laminate	4mm	50%	80% a 0° , 20% a $\pm 45^\circ$
Shear	4mm	50%	20% a 0° , 80% a $\pm 45^\circ$
Alas	8mm	(50%)	(= Lamine + Shear)

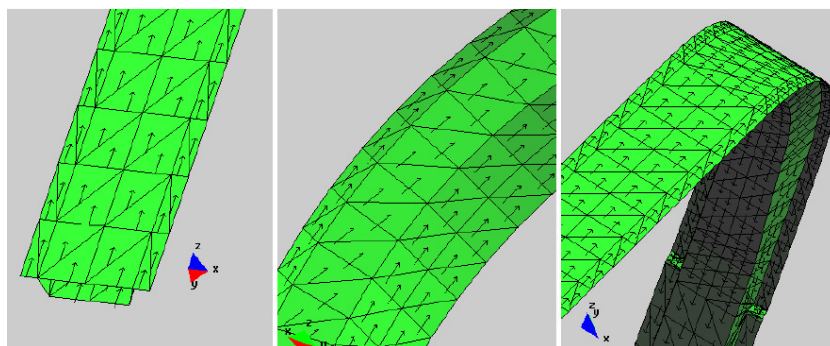


Figura 7.11: Conceito 1 (versão II) – Orientação das fibras
fonte: [1]

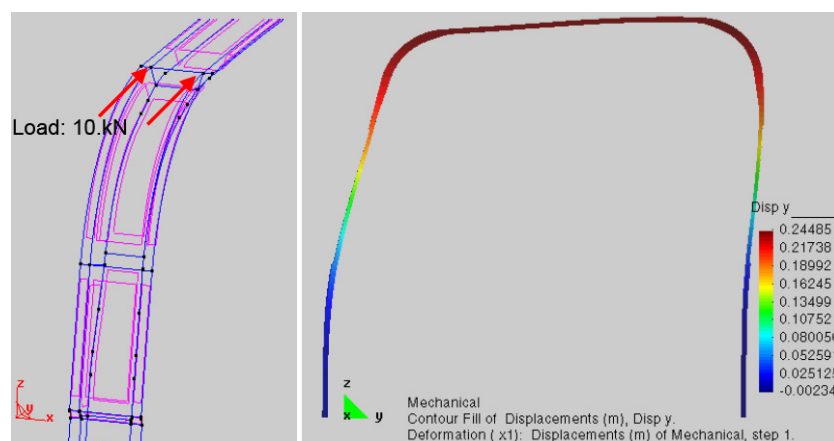


Figura 7.12: Conceito 1 (versão II) – Cargas e resultados da análise
fonte: [1]

Os resultados mostrados na Figura 7.12 revelam um comportamento melhor desta segunda

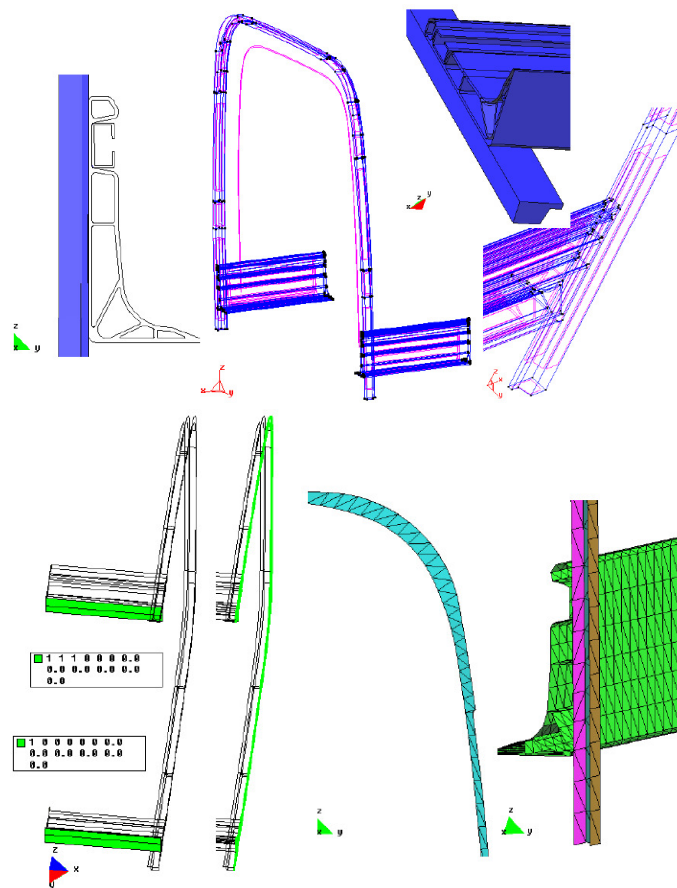


Figura 7.14: Conceito 1 (versão III) – Modelo considerado na análise
fonte: [1]

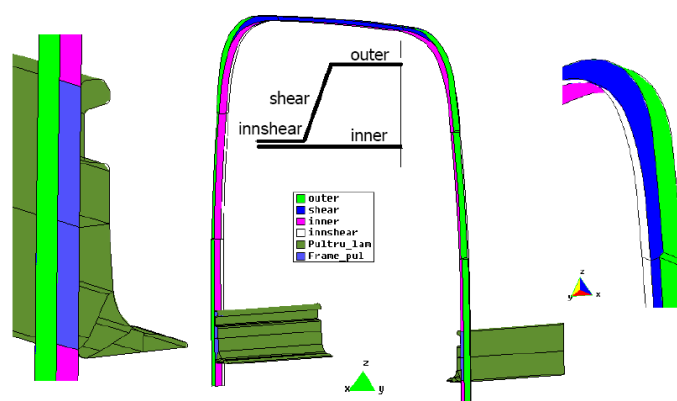


Figura 7.15: Conceito 1 (versão III) – Materiais
fonte: [1]

Os materiais adoptados foram (ver Figura 7.15):

Tabela 7.3: Conceito 1 (versão III) – Materiais adoptados
fonte: [1]

<i>Material</i>	<i>Espessura</i>	<i>Volume de fibra</i>	<i>Orientações</i>
"Inner"	5mm	50%	80% a 0°, 20% a $\pm 45^\circ$
"Shear"	5mm	50%	20% a 0°, 80% a $\pm 45^\circ$
"Innshear"	10mm	50%	(= Inner + Shear)
"Pultru_lam"	5mm	50%	material homogéneo
"Innshear"	10mm	50%	(= Inner + Pultru_lam)

Da análise elástica resulta que não há invasão da célula de sobrevivência quando a carga aplicada é de 10 kN em cada pórtico (Figura 7.16). O material do perfil pultrudido usado no canto inferior foi considerado homogéneo isotrópico como primeira aproximação (50% fibra de vidro 50% matriz epoxídica). Isto significa que as fibras são necessárias em todas as direcções. Esta aproximação é um pouco grosseira dado que análise com fibras unidireccionais no perfil pultrudido não produz efeito significativo devido à falta de rigidez transversal.

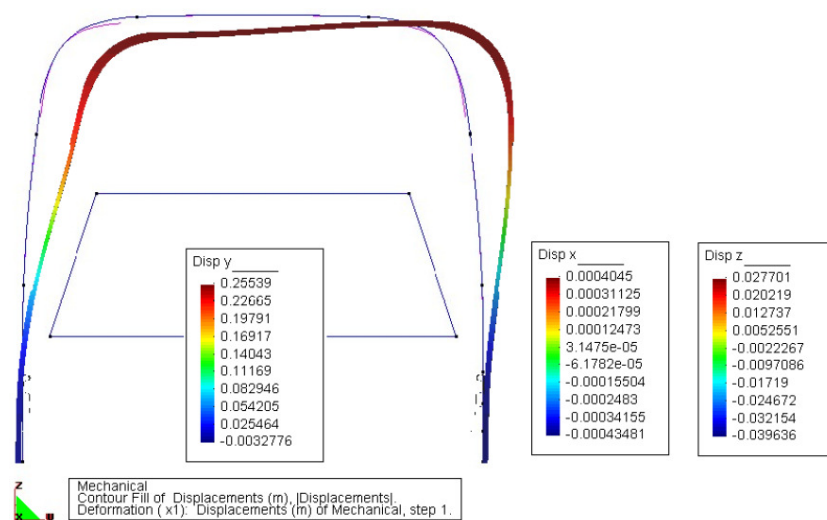


Figura 7.16: Conceito 1 (versão III) – Deslocamentos (Força = 10kN)

O CIMNE efectuou também uma análise elasto-plástica (considerando a matriz como um material elastó-plástico). Os resultados podem ser vistos na Figura 7.17.

A invasão da célula de sobrevivência só acontece para uma carga de 20.kN em cada pórtico, valor que é quase o dobro do necessário para causar a invasão em pórticos de aço actuais.

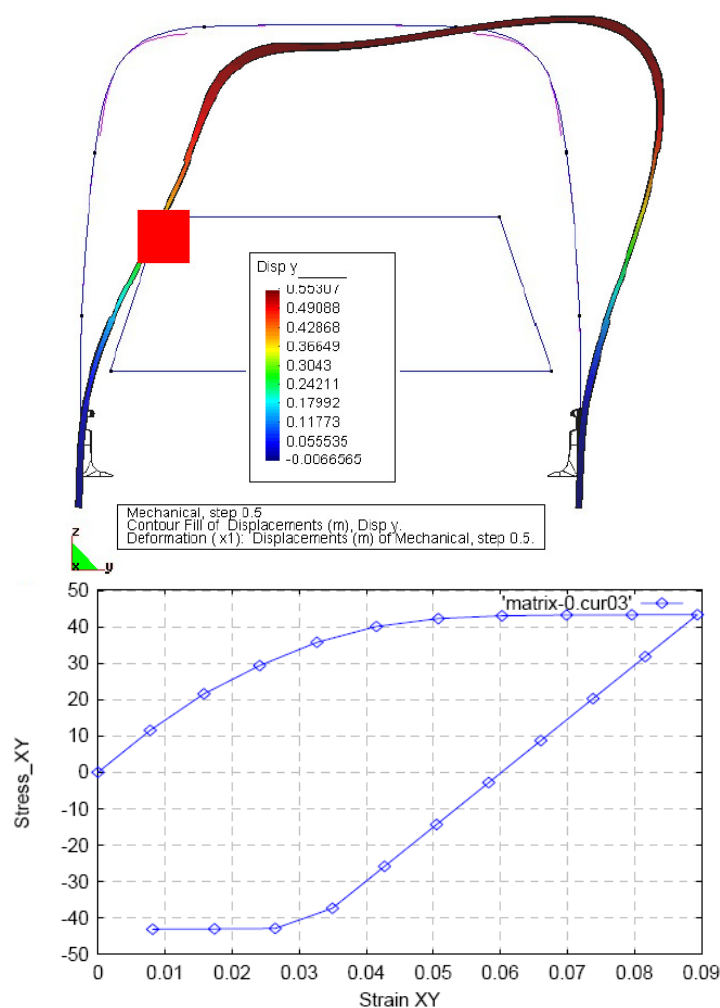


Figura 7.17: Conceito 1 (versão III) – Análise elastó-plástica

Nota: Força aplicada 20kN; Na parte inferior, é apresentada a curva tensão de corte/deformação da matriz
 fonte: [1]

Foram considerados necessários os passos seguintes:

- Verificação das mais recentes análises:
 - melhoria da malha, da introdução da carga e das restrições (impostas ao perfil pultrudido);
 - comparação com análises recorrendo a outros códigos;
- Fazer uma nova série de análises:
 - afinar as propriedades mecânicas dos materiais usados nos componentes (tanto ao nível de fibra como da matriz), usando sempre que possível valores experimentais;

- eventual correcção do empilhamento do laminado;
 - considerar o contributo do núcleo de espuma para a rigidez e absorção de energia;
 - inclusão dos painéis laterais e do tejadilho.
- Estimar as frequências e os modos de vibração da estrutura.

Uma secção básica do autocarro inclui:

- Dois pilares em "U" (invertido), produzido por RTM.
- Painéis sanduíche laterais (montados no pilar por colagem).
- Reforço longitudinal, produzido por pultrusão com resina de poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro e com núcleo.
- Pavimento em Sonofloor.

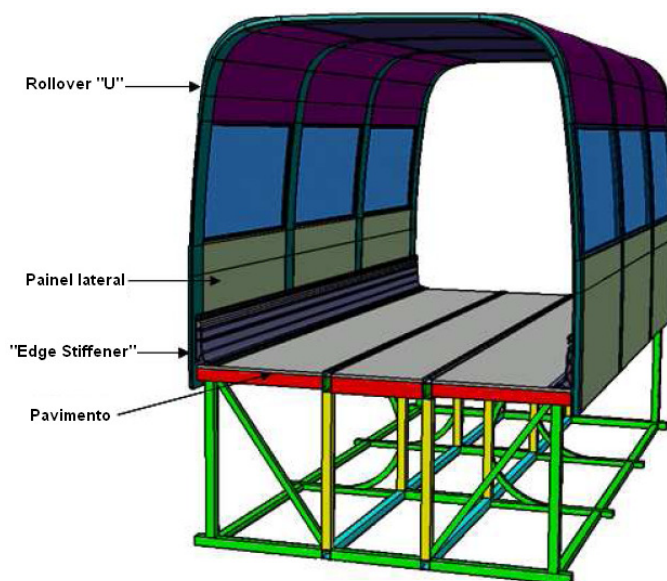


Figura 7.18: Componentes da estrutura
fonte: [1]

7.2 Análise modal

Os resultados das análises a três estruturas de autocarros [3], cada uma proposta por um dos construtores do consórcio LiteBus, podem ser resumidos na Tabela

Tabela 7.4: Resultados das análises modais
fonte: [3]

<i>Construtor</i>	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6
Secção completa livre-livre						
CAETANOBUS	4.1664	6.9304	11.979	14.712	15.721	15.843
SUNSUNDEGUI	6.4502	9.5287	13.575	16.840	18.563	21.466
MAURI	4.9591	7.8858	10.515	15.742	17.415	18.379
Estrutura em "U" livre-livre						
CAETANOBUS	0.81372	4.7743	8.3004	9.6294	10.391	11.437
SUNSUNDEGUI	1.2349	6.6786	10.455	10.492	11.082	13.675
MAURI	1.0091	4.4184	10.332	10.433	10.643	15.714
Estrutura em "caixa" livre-livre						
CAETANOBUS	2.7969	6.0694	7.8039	10.734	12.468	13.510
SUNSUNDEGUI	2.2810	4.1349	4.5384	7.0369	7.3387	12.573
MAURI	2.5568	4.4864	4.5957	6.5550	8.2168	10.958

As Figuras a mostram as estruturas em causa.

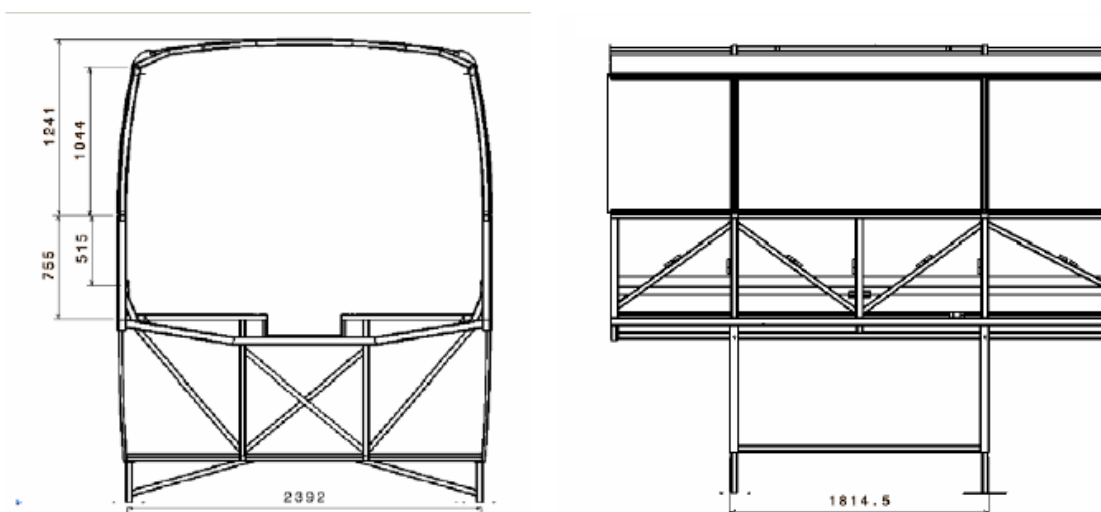


Figura 7.19: Estrutura CAETANOBUS
fonte: [3]

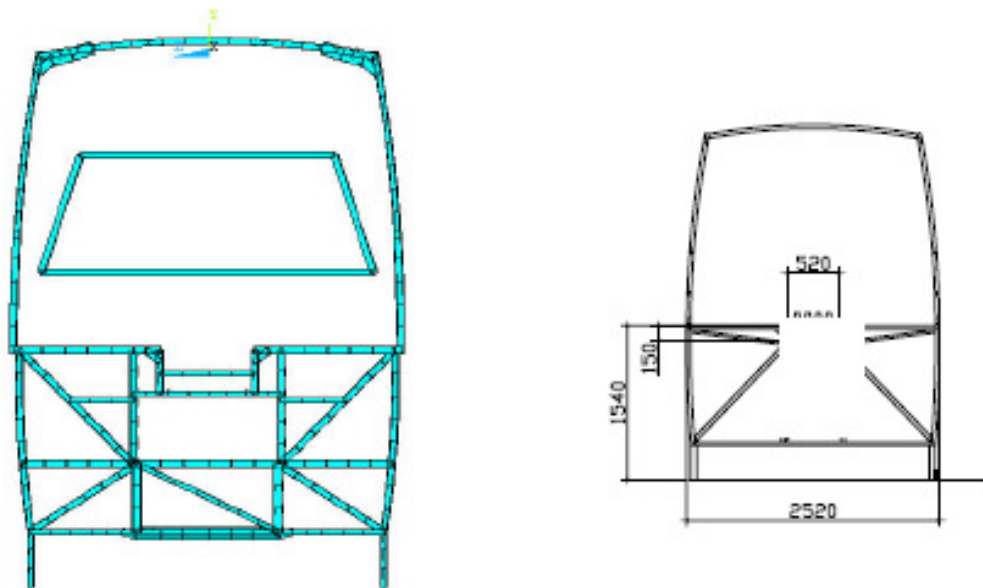


Figura 7.20: Estrutura SUNSUNDEGUI
fonte: [3]

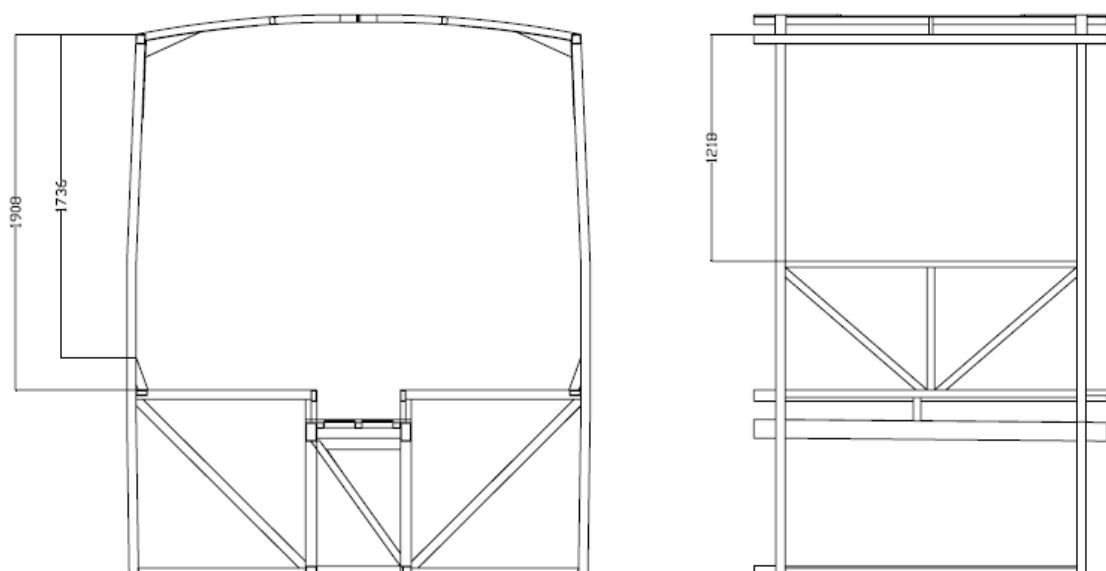


Figura 7.21: Estrutura MAURI
fonte: [3]

7.3 Bibliografia

- 1 CIMNE, LITEBUS - First Year Activity Report, October 2007, Confidencial
- 2 TU Clausthal, LITEBUS - First Year Activity Report, October 2007, Confidencial
- 3 UPM, LITEBUS - Activity 1.2 – R 002, Janeiro 2007, Confidencial

CAPÍTULO 8

Modelos desenvolvidos

Nesta secção discutir-se-á o desenvolvimento dos modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos, usando elementos de casca, contínuos (sólidos) ou a sua combinação. Os modelos permitiram analisar o comportamento estático do corpo do autocarro. Serviram para a comparação com os modelos do CIMNE e com resultados experimentais. A malha utilizada pelo CIMNE foi-nos enviada para iniciarmos os estudos comparativos. Foi necessário um trabalho inicial de importação para ABAQUS. As primeiras análises foram focadas nos componentes individuais desse modelo: o pilar em "U" e o perfil pultrudido (*floor rail*). Foi feita a análise de elementos finitos para determinação da deformação do perfil com e sem espuma. As configurações foram ainda analisadas em duas hipóteses de orientação de fibras: fibras orientadas no sentido longitudinal, que corresponde à situação base num perfil pultrudido, e o laminado quase-isotrópico, que constitui, na prática, o limite dos esforços que se pretende fazer para aumentar a rigidez transversa do componente.

Os modelos com cascas usando elementos casca convencionais ou do tipo "continuum shell", permitem a utilização do modelo de dano para laminados compósitos do ABAQUS. Foi também feita a modelação com elementos sólidos para permitir confirmar a influência da espuma no componente e no modelo numérico.

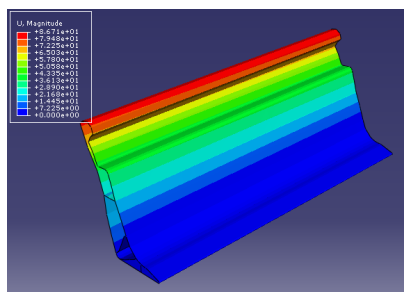
8.1 Perfil Pultrudido

Foram feitos quatro modelos com material pultrudido ortotrópico: um usando a malha fornecida pelo CIMNE, dois com elementos sólidos (um sem núcleo espuma e outro com) e dois modelos simplificados, usando elementos casca do tipo "continuum shell" (um sem núcleo espuma e outro com). Os resultados foram os seguintes:

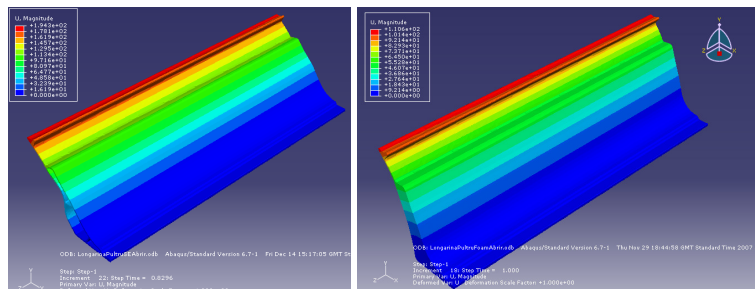
Tabela 8.1: Deformações no perfil com ou sem espuma

<i>Perfil</i>	<i>U_{max} (mm)</i>
Original (sem espuma)	86.7
Sólido sem espuma	194
Sólido com espuma	110.6
Simplificado sem espuma	49
Simplificado com espuma	94

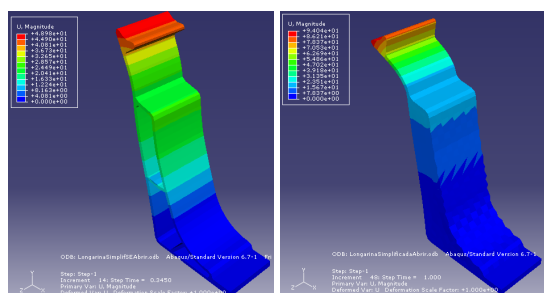
A Figura mostra as deformadas obtidas para cada um dos modelos.



Original, anisotrópico



Sólido, anisotrópico sem espuma com espuma



Simplificado, anisotrópico sem espuma com espuma

Figura 8.1: Deformada do perfil pultrudido

8.2 Modelo com um pilar e perfis pultrudidos

8.2.1 Modelo misto

Este é o modelo mais directamente comparável com o do CIMNE. Foi feito de acordo com o regulamento UNECE R66, com a finalidade de avaliar o efeito da espuma do núcleo e para comparação com os resultados do CIMNE e UPM-INSIA. Tentou-se a simplificação do modelo, misto, com elementos de cascas (*continuum shell elements*) e elementos sólidos. Pretendia-se tornar possível a utilização do critério de dano de Hashin nos elementos de casca incluídos em secções compósitas e permitir a posterior inclusão do chassis, para obter o modelo completo da secção.

8.2.2 Modelo sólido

Foi ainda construída uma primeira versão de modelo sólido, com a mesma configuração. Os resultados estão mostrados nas Figuras 8.2 e 8.3.

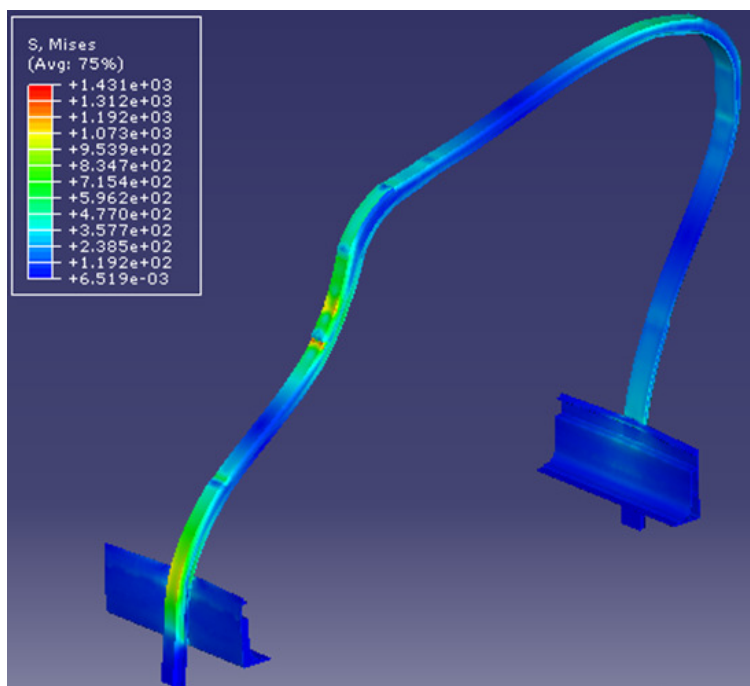


Figura 8.2: Modelo pilares e perfis pultrudidos - Tensões

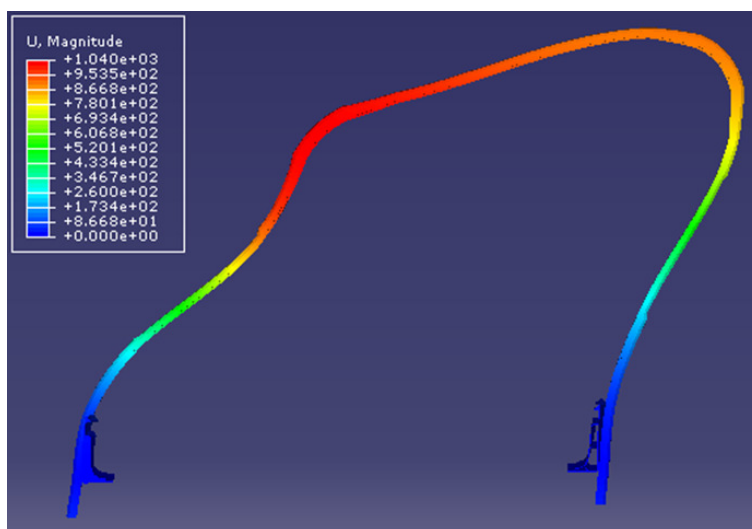


Figura 8.3: Modelo pilares e perfis pultrudidos - Deformação

8.3 Modelo para selecção da sequência de empilhamento

Perante a duvida da sequência mais indicada para obter um laminado simétrico com as proporções definidas pelo CIMNE, foi contruído um modelo de uma placa comprida (1.2m) de laminado encastrada nas extremidades mais curtas e sujeitas à colisão com um cilindro rígido que contra ela é lançado numa direcção normal ao seu plano de repouso.

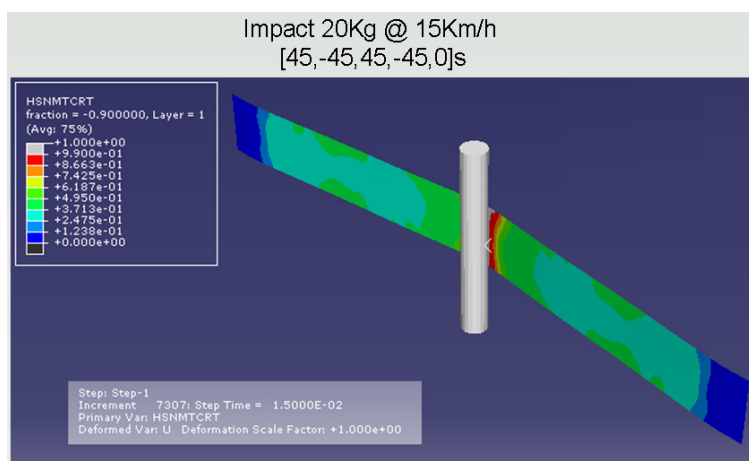


Figura 8.4: Instante da simulação do impacto lateral

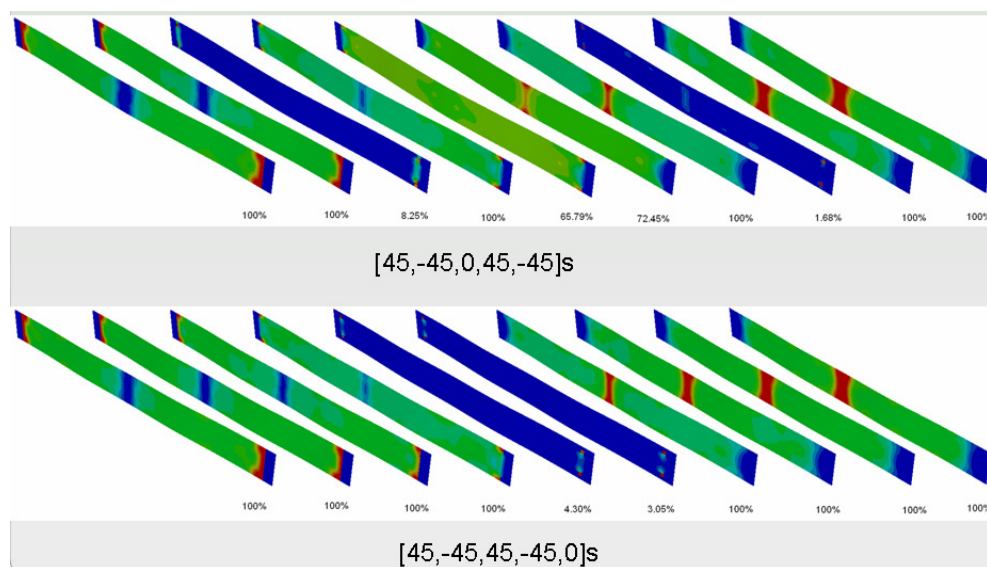


Figura 8.5: Mapeamento do dano máximo por camada

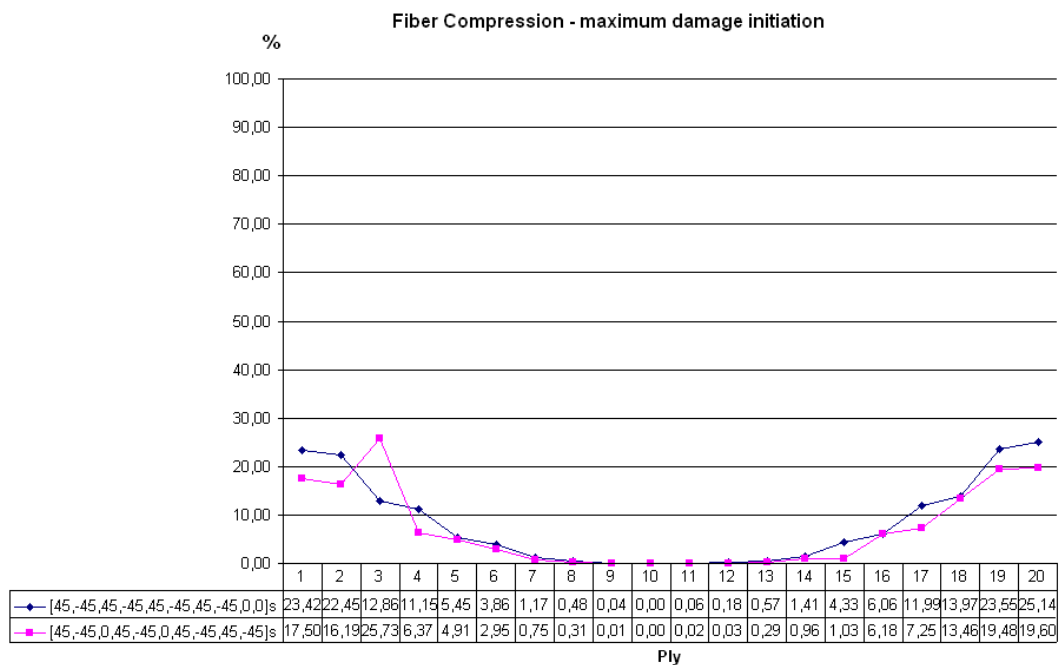


Figura 8.6: Gráfico do dano nas camadas ao longo da espessura

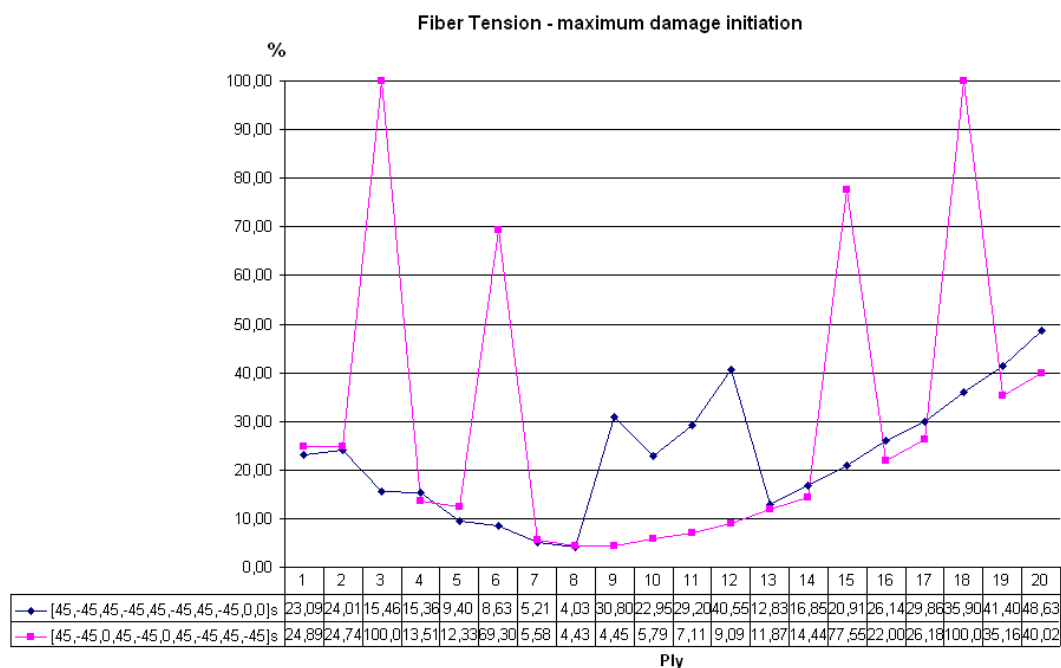


Figura 8.7: Gráfico do dano nas camadas ao longo da espessura

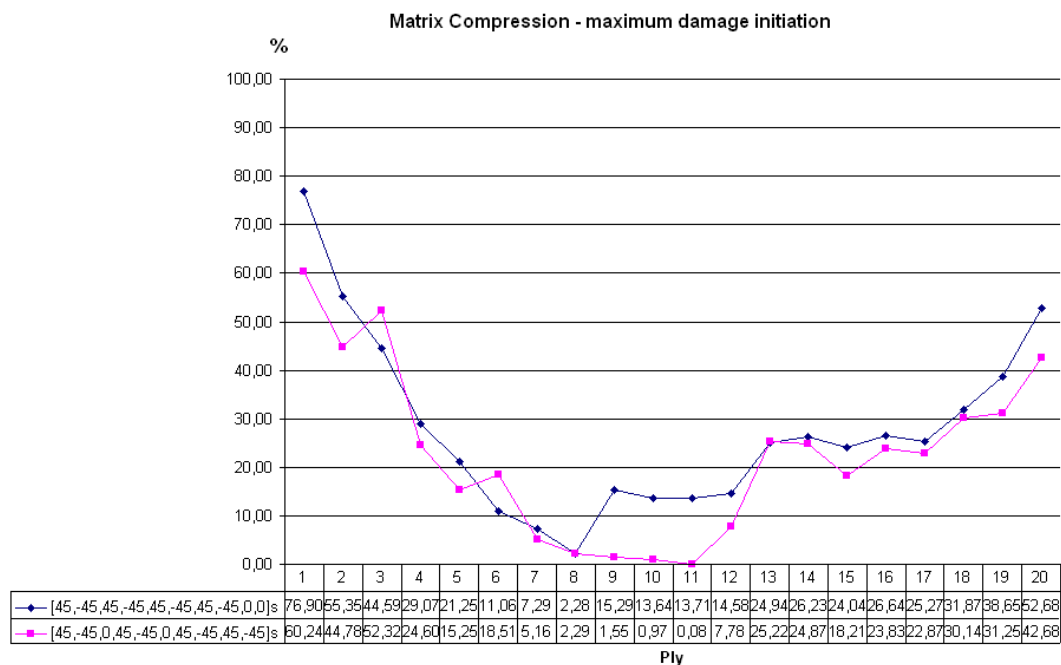


Figura 8.8: Gráfico do dano nas camadas ao longo da espessura

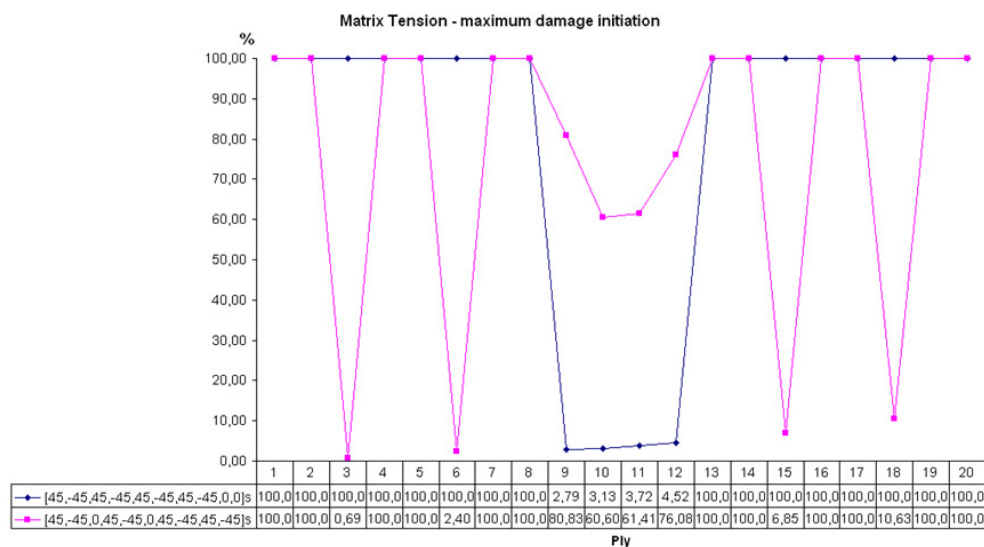
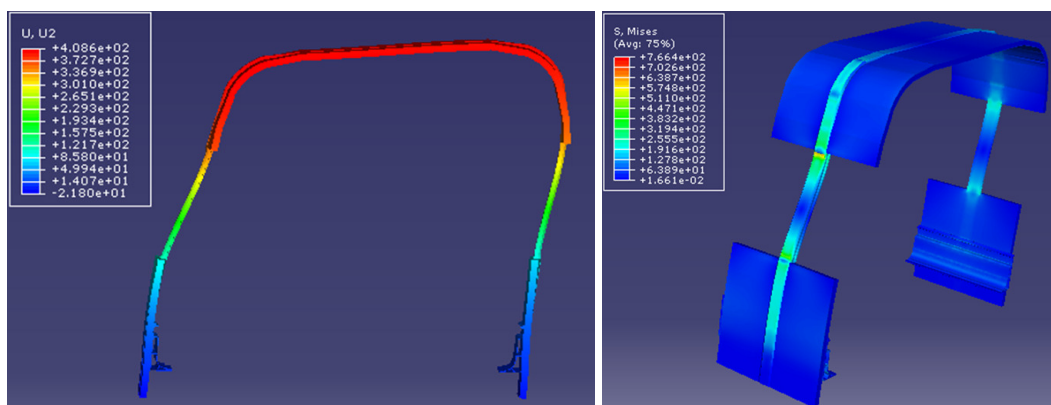


Figura 8.9: Gráfico do dano nas camadas ao longo da espessura

8.4 Modelo com painéis

Foi então criado um novo modelo com elementos sólidos, satisfazendo o regulamento UNECE R66 e que inclui meio painel lateral e meio painel de tejadilho em cada um dos lados. Não foram aplicadas as condições de simetria nos bordos livres dos painéis e dos perfis pultrudidos para diminuir intencionalmente a rigidez e avaliar a energia absorvida nas condições em que a estrutura seria constituída apenas pela parte modelada dos componentes. Foi retirada a espuma dos perfis pultrudidos para aligeirar o modelo. As principais desvantagens deste modelo são a impossibilidade de determinar o dano e considerar as consequências da sua ocorrência nos laminados e o facto de o chassis ser considerado na forma de encastramento das bases dos perfis pultrudidos. Esta última desvantagem deve-se ao aumento artificial da rigidez da estrutura. Este aumento é enganador em dois aspectos. Primeiro, leva-nos a prever uma invasão do espaço residual mais tardia do que a real, por considerações puramente elásticas. Segundo, leva ao aparecimento de níveis de tensão maiores, para os quais pode ser identificado dano e consequente degradação de propriedades mecânicas que se afastem do cenário real.

No gráfico da Figura 8.11 está assinalado o instante em que se prevê o início da invasão do espaço residual. Até esse instante, a energia absorvida (elasticamente, neste tipo de modelo) é cerca de 6,3KNm. Existe alguma dúvida quanto ao valor a considerar aceitável. A dúvida está associada à ausência dos painéis laterais e de tejadilho e à não existência de um chassis, também ele capaz de absorver alguma da energia. Isto traz-nos um problema de filosofia de projecto. Em boa verdade, se quisermos escusar-nos à incerteza associada às



Deformação – máx: 40,9cm
Tensões (vonMises) – máx: 766.4MPa

Figura 8.10: Modelo com painéis

ligações adesivas desses painéis ao pilar, somos forçados a considerar que o pilar deve por si só absorver a quase totalidade da energia de capotamento. Nessa perspectiva, este valor de energia pode ser considerado baixo.

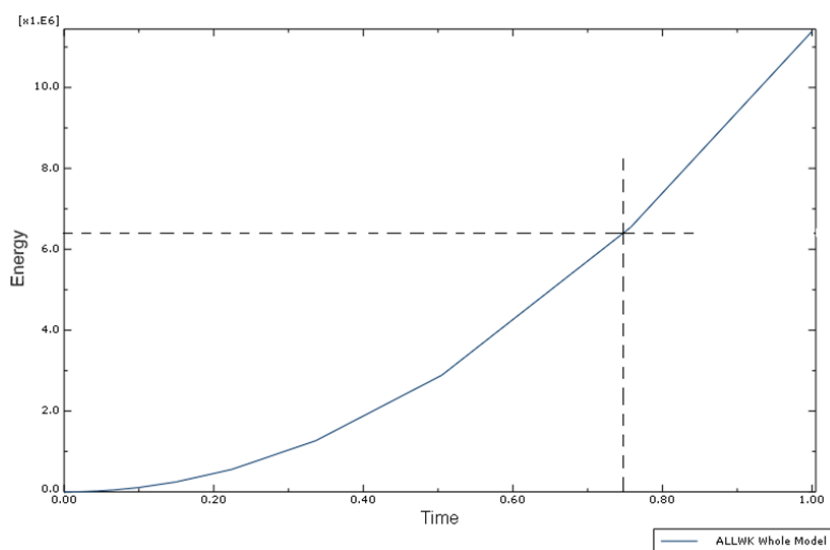


Figura 8.11: Modelo com painéis - Trabalho externo

8.5 Modelo do plataforma da célula

Para que não sejam aumentada de forma artificial a rigidez da estrutura, avançou-se para a eliminação dos encastramentos das bases dos perfis pultrudidos e para a construção de modelos onde o chassis é introduzido e a estrutura lhe é ligada da forma o mais realista possível. Fez-se então um estudo do chassis em aço, por forma a caracterizar o seu comportamento.

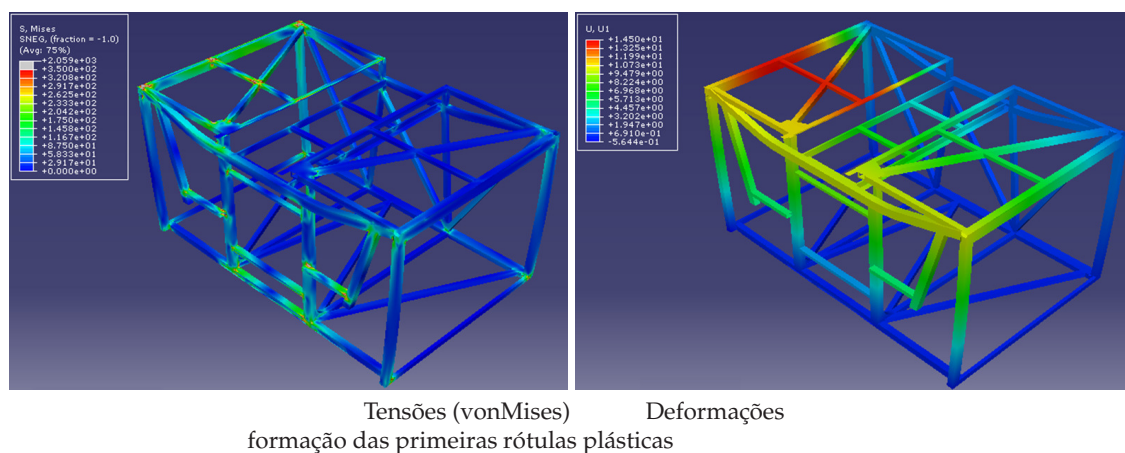
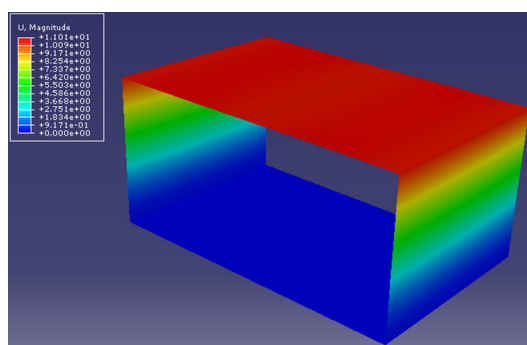


Figura 8.12: Modelo do chassis



Equivalente para a solicitação em causa – cascas

Figura 8.13: Modelo do chassis

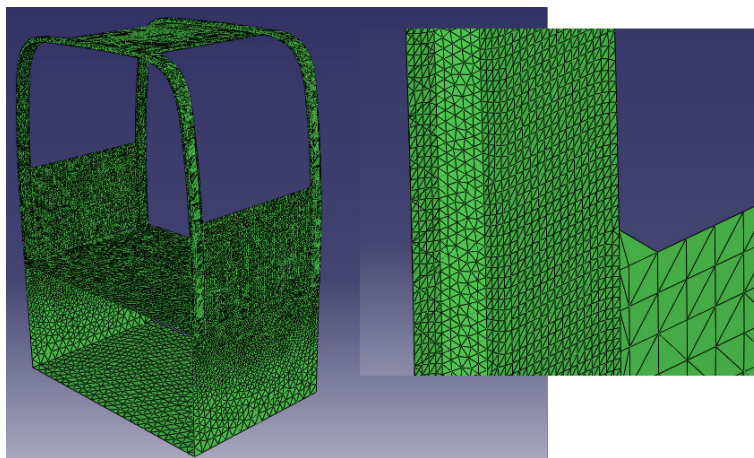


Figura 8.14: Primeira proposta de modelo de cascas com chassis

8.6 Modelo de cascas da secção (2 pilares)

A primeira proposta de modelo completo foi abandonada. E foi feita uma malha completa de raiz. A Figura 8.15 mostra a malha sem as fronteiras dos elementos. Não chegou a ser modelado o chassis, uma vez que se suspeitou que estas malhas apresentavam problemas numéricos. Ver ensaio do canto do pilar, onde foi feita a verificação experimental dos resultados.

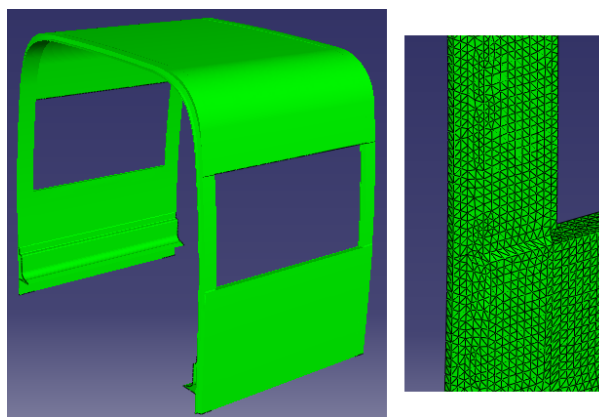


Figura 8.15: Malha do modelo de cascas com chassis

8.7 Modelos dos ensaios realizados

Foi feita simulação numérica, construção de protótipos e validação experimental dos modelos do canto do pilar e da parte recta do pilar (zona da janela). Nestes estudos foram feitas comparações com os que foram feitos para o pilar do FEUP-Bus. A Figura 8.18 mostra os resultados da análise do ensaio do canto do pilar.

8.7.1 Malha de elementos de casca

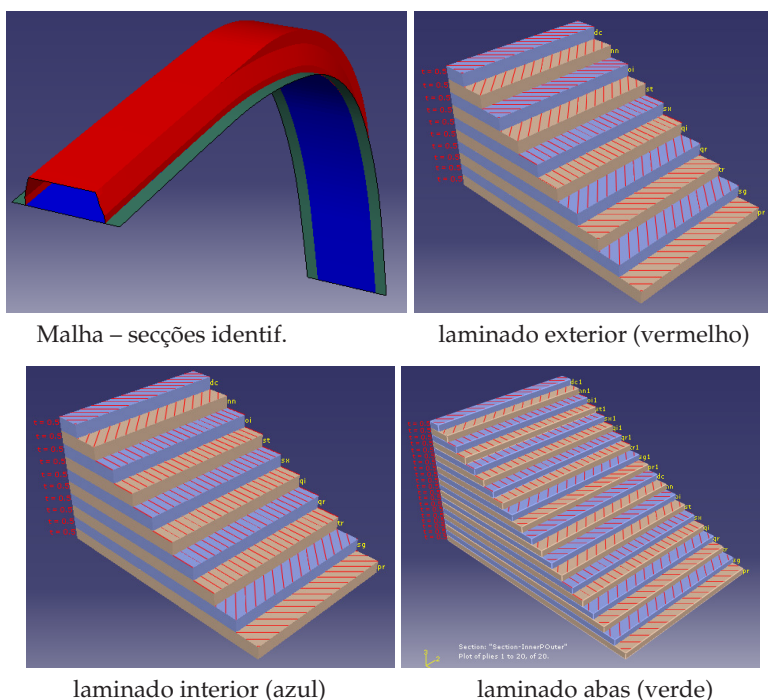


Figura 8.16: Modelo do ensaio do canto do pilar

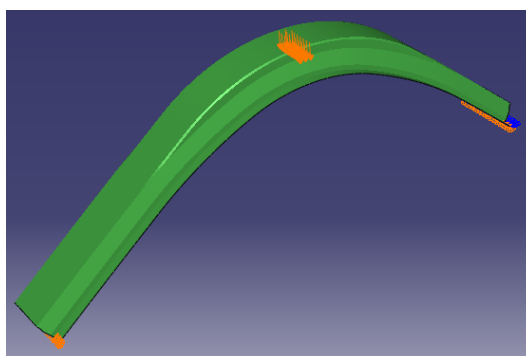


Figura 8.17: Uma das configurações de carga usadas

As Figuras 8.18 e 8.19 mostram os resultados da análise do ensaio da parte do pilar na zona da janela.

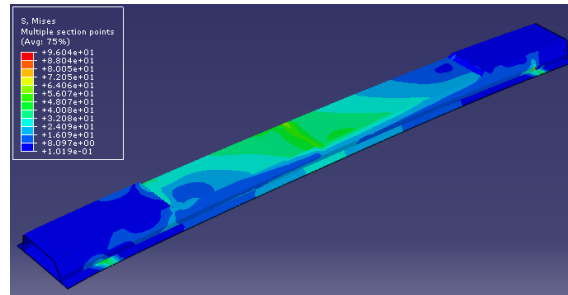


Figura 8.18: Tensões no pilar

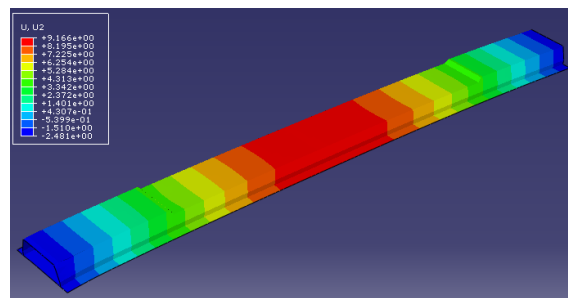


Figura 8.19: Deslocamentos

8.7.2 Malha de elementos sólidos

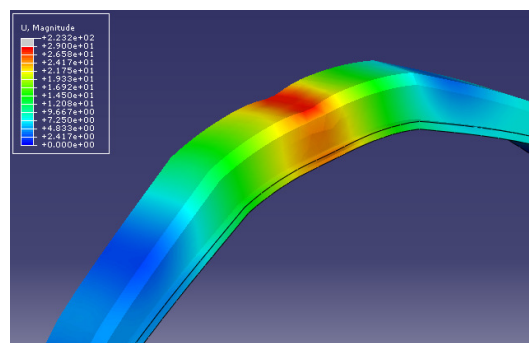


Figura 8.20: Deslocamentos durante o ensaio da curva do pilar

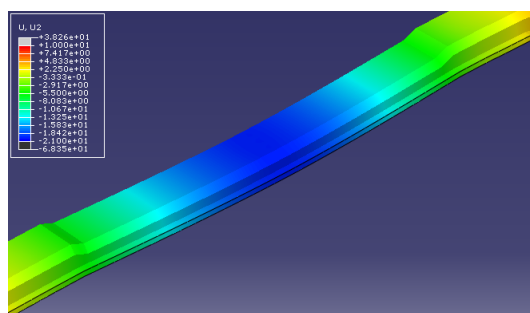


Figura 8.21: Deslocamentos durante o ensaio do pilar recto

8.8 Modelo com painéis corrigido

8.8.1 Análise estática

Como vimos, os modelos baseados em malhas com elemento de cascas foram abandonados. Foram retomados os modelos mais completos com elementos sólidos. Destes foram extraídos modelos parcelares para fazer a simulação dos ensaios realizados ao canto do pilar e ao pilar recto (zona da janela). Os resultados das análises feitas podem ser resumidos conforme é apresentado na Tabela 8.2.

Tabela 8.2: Resultados das simulações dos ensaios

	Ensaio experimental (KN.m)	Modelo numérico (KN.m)	Modelo/Ensaio (-)
Window Pillar d=9,1mm	13	12,7	0.98
Corner d=10mm	15,5	70	4,5
Corner d=40mm	250	1000	4

Destes resultados se conclui que embora a simulação do ensaio do canto corra até ao final, a rigidez previstas é falsa e demasiado elevada. Dado que a geometria é em tudo idêntica à do modelo de cascas, reforça-se a suspeita de os erros numéricos terem origem na geometria, pelo que se optou por baixar artificialmente as propriedades mecânicas e usar materiais isotrópicos no canto do pilar. As propriedades foram afinadas por tentativa-erro. Foi ainda considerado um factor de segurança igual a 3, para tomar em consideração a incerteza associada ao processo e degradação. O factor foi aplicado às propriedades, uma vez que as

solicitações estão definidas com clareza. Assim, os materiais do nosso pilar corrigido são os mostrados na Figura 8.22 (a modificação está assinalado a azul).

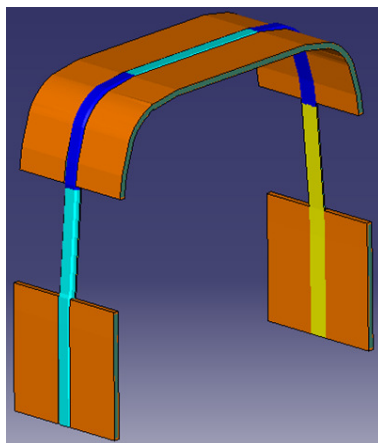


Figura 8.22: Materiais do modelo corrigido

Os resultados, no instante em que já foi absorvida uma energia de 10KN.m, são mostrados na Figura 8.23. Como se pode constatar pelos deslocamentos previstos, esta estrutura não satisfaz os requisitos do UNECE R66.

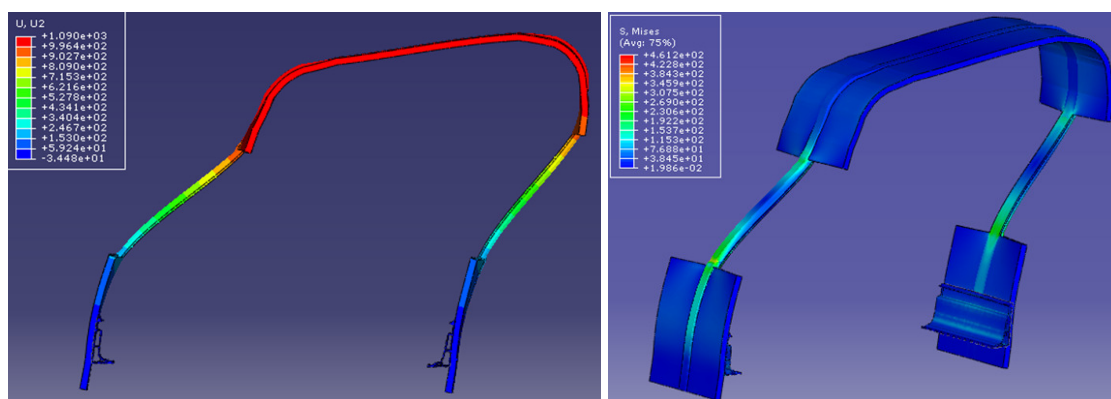


Figura 8.23: Resultados do modelo corrigido

A análise pode ser considerada válida dado que os valores máximos de tensão do critério de vonMises são da ordem dos 461Mpa em tracção e 198MPa em compressão. Embora este critério não se aplique minimamente aos compósitos, dá-nos uma ideia dos níveis de tensão na estrutura. Para os valores em causa, é razoável afirmar que estamos quando muito perto da iniciação do dano. Por aqui se confirma que o nosso grande problema é a rigidez e não a resistência.

8.8.2 Análise dinâmica

A Figura 8.24 mostra os resultados da análise dinâmica.

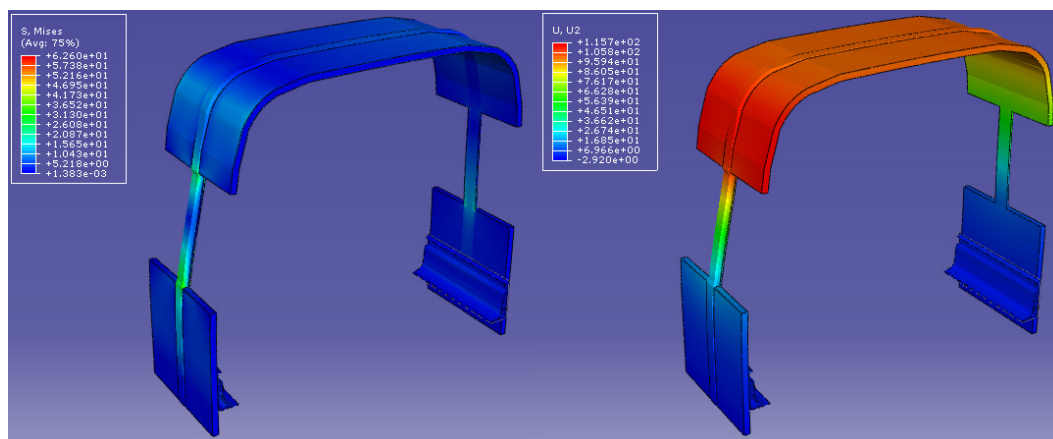


Figura 8.24: Resultados da análise dinâmica

A Figura 8.24 compara o trabalho externo calculado na análise dinâmica e na análise quase-estática.

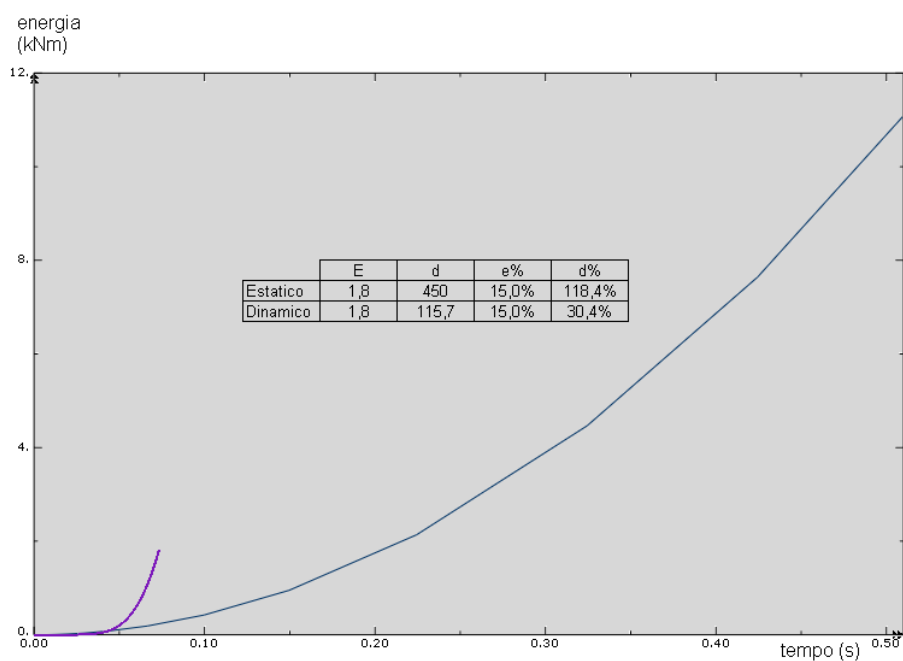


Figura 8.25: Resultados da análise dinâmica

8.8.3 Análise modal

Foi calculada a frequência fundamental da estrutura do autocarro em compósito e comparada com a das estruturas actuais em aço, limitando à partida a possibilidade de ocorrência de ressonância em condições normais de serviço. A Figura 8.28 e 8.29 mostra os resultados da análise modal do modelo de elementos sólidos da secção com um pilar.

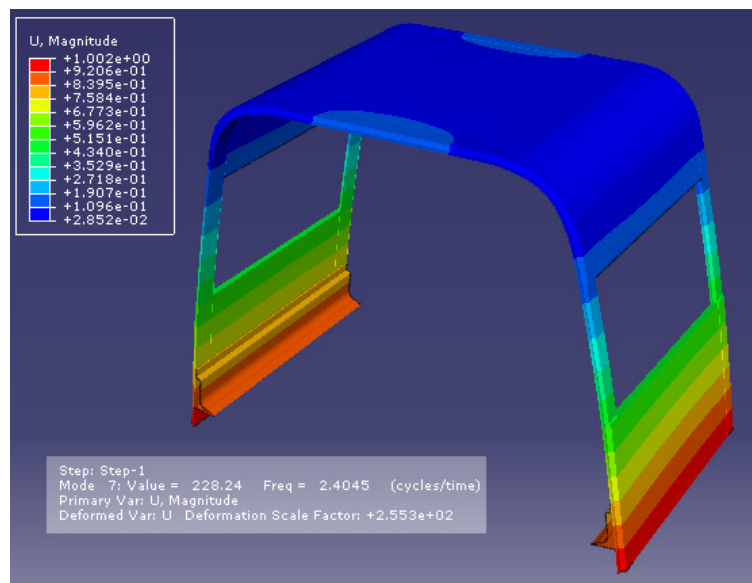


Figura 8.26: Primeiro modo de vibração

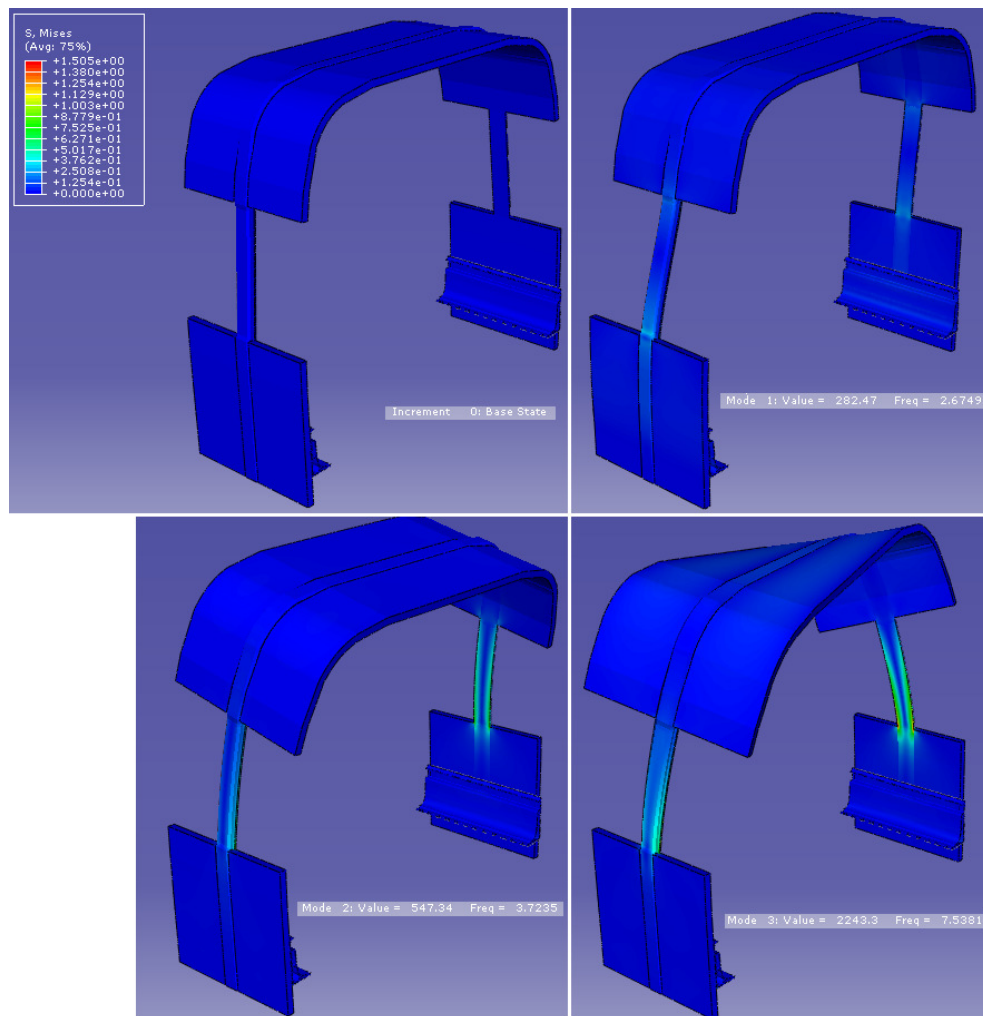


Figura 8.27: Os três primeiros modos de vibração

8.8.4 Análise térmica

Como vimos na revisão dos critérios de dano, um aspecto fundamental que deve ser considerado é o aparecimento de tensões residuais devidas ao arrefecimento desde a temperatura de pico exotérmico até à temperatura ambiente. Dado que surge na moldação dos componentes, deverá ser feita para cada componente em separado. Essa análise foi feita para o caso do pilar. As Figuras 8.28 e 8.29 mostra os resultados da análise térmica do modelo de elementos sólidos do pilar.

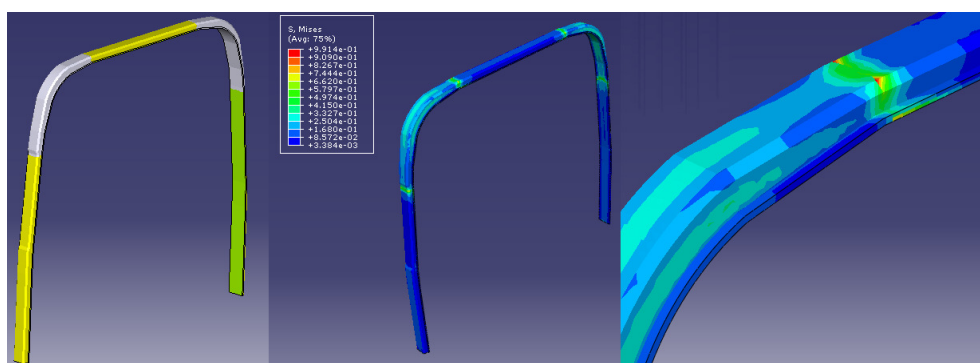


Figura 8.28: Resultados da análise térmica

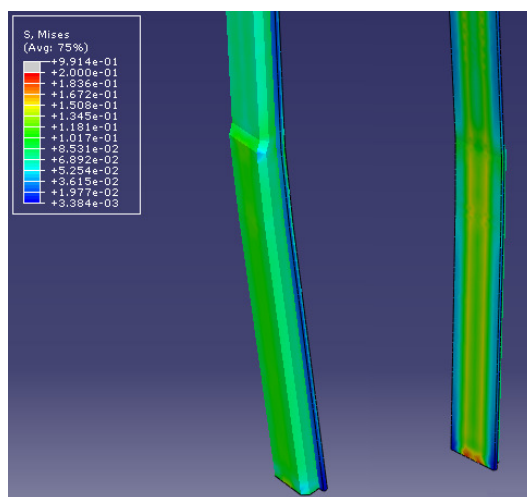


Figura 8.29: Resultados da análise térmica

Parte V

Análise e discussão dos resultados

Página intencionalmente em branco

Dos resultados dos ensaios, podemos concluir que o pilar produzido no INEGI apresenta uma rigidez e uma resistência maior do que os produzidos em Clausthal. Isso deve-se ao facto de os laminados não serem idênticos. Por um lado, os tecidos usados não tinham a mesma gramagem e, por outro, a consolidação foi mais bem conseguida pelos parceiros alemães. Um aspecto que permitiu essa maior consolidação, foi a mais correcta geometria do núcleo de espuma, que permitiu acomodar melhor as fibras. Assim, os laminados do INEGI são mais espessos mas têm menor percentagem volúmica de fibras, embora em termos absolutos tenham realmente mais fibra.

O pilar do INEGI apresentou uma rigidez inesperadamente baixa no primeiro ensaio, dado que a fixação não foi feita da forma mais correcta. Contudo, mostrou ser superior quando carregado em sentido contrário. Provou ainda conseguir manter melhor a rigidez durante os intervalos em que a carga é mantida constante. Pelo contrário, os pilares produzidos em Clausthal perdiam rigidez de forma acentuada durante essas paragens.

Em termos de resistência, o pilar do INEGI teve sempre os melhores resultados. No sentido de "fecho" – de acordo com a convenção adoptada isso acontece quando o pilar entra para o interior do autocarro – a resistência é cerca do dobro da dos pilares alemães. No sentido contrário, a diferença esbate-se e ronda os 20%. Será, ainda assim, interessante notar que como o anel tem dois pilares a trabalhar em sentidos opostos e que o vão mais relevante (o da janela) é da mesma grandeza que a distância entre a fixação e o ponto de aplicação da carga nos ensaios realizados. Assim, numa primeira aproximação do valor de resistência necessária podemos considerar a soma dos valores de carga máxima suportada em cada um dos sentidos. Ou seja, teremos 11kN de carga máxima para um anel com uma construção igual á dos pilares alemães e 16kN no caso de uma construção portuguesa. Não andam muito longe dos 10kN tomados como referência, embora o factor de segurança seja baixo. Contudo, as modificações a fazer para que os pilares tenham a rigidez necessária irão de certo contribuir para o aumento da resistência.

Estas considerações estão de acordo com os estudos comparativos dos resultados dos ensaios dos pilares em sanduíche compósita e de pilares em aço, feitos pelo INSIA.

Os resultados das análises numéricas das secções de carroçaria foram comparados com os obtidos pelo CIMNE. Os resultados das análises numéricas dos ensaios foram comparados com os resultados experimentais. As conclusões destas comparações foram usadas para melhorar os modelos das secções de carroçaria.

Os resultados das análises feitas para as vários modelos do perfil pultrudido permitem afirmar o seguinte:

- Tanto no caso do modelo sólido como no simplificado se constata que o componente é mais rígido e valores menores de tensão máxima, quando tem núcleo em espuma.
- A previsão de dano é diferente no modelo original e no simplificado.

- A distribuição da carga na superfície onde serão colados os painéis e os pilares, levanta problemas nos modelos com casca (os mais graves de todos no modelo simplificado (misto)).
- O modelo simplificado apresenta problemas graves de hourglass, que tiveram que ser minimizados criando uma pele externa muito fina, sólida homogênea e isotrópica, na área de carregamento para que este seja possível.
- Embora não permita previsão de dano, o modelo sólido parece ser mais realista no domínio elástico. Esta opção poderá melhorar a representatividade do modelo.

O modelo misto – com elementos de cascas (*continuum shell elements*) e elementos sólidos – com um pilar e perfis pultrudidos provou não ser satisfatório. Além disso, a rigidez era muito baixa: a uma carga de 10KN correspondia uma energia elástica de 1.9KNm, contra os 10 a 12KNm por pilar que seria razoável esperar. Pelo que se tentou a modelação com elementos sólidos apenas.

Um das dificuldades sentidas na construção dos modelos do canto do pilar e da parte recta do pilar (zona da janela) tem a ver com as zonas de transição entre laminados. De facto, não é possível modelar de forma distinta situações tão diferentes como as apresentadas na Figura 8.30.

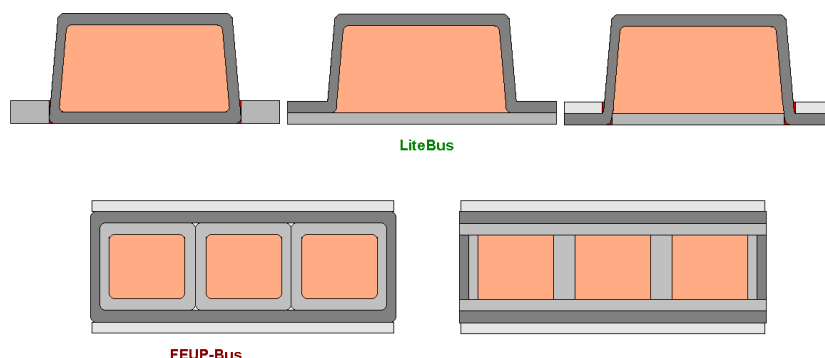


Figura 8.30: Diferentes configurações com modelação idêntica

O comportamento mecânico de uma viga será diferente consoante a configuração concreta da sua secção transversal. O problema é ainda mais grave dado que em cada uma dessas configurações há uma propensão diferente para o aparecimento de zonas ricas em resina. Pelo que, as zonas de transição em especial poderão apresentar fracções volúmicas de fibras muito diferentes numa configuração ou noutra. Além disso, algumas configurações permitem maior compactação das fibras. Destas considerações, resulta que as tensões residuais após cura são também diferentes. Porém, o nosso caso corresponde à configuração de empilhamento mais simples, sem cruzamento nem descontinuidade de camadas. Assim, corresponderá em princípio ao caso mais fielmente representado pelo modelo, embora seja

uma aproximação grosseira.

A segunda dificuldade é a consideração do núcleo em espuma estrutural. Dadas as proporções de cada um dos constituintes da estrutura sanduíche e mantendo o número de elementos finitos dentro dos limites do ABAQUS e do computador, vemo-nos forçados a recorrer a elementos do tipo sólido para modelar o núcleo e *"continuum shell"* para modelar as peles.

Este problema pode, no entanto, ser ultrapassado com considerações de ordem prática. Ao contrário dos metais, as espumas estruturais apresentam propriedades que variam fortemente com a temperatura. O Regulamento 66 da UNECE foi feito no pressuposto de a verificação ser feita nas normais condições de serviço. Para os metais, a temperatura não representa um problema e não é expressamente tratado. Mas não faz sentido afirmar a conformidade da estrutura quando os cálculos se baseiam em propriedades que de forma nenhuma vão acontecer em condições normais de circulação. Apesar de ainda não haver informação gerada pelo consórcio sobre o perfil de temperaturas que as sanduíches a adotar na solução final terão em serviço, podemos socorrer-nos da expectativa que resulta da experiência. É consensual que este tipo de estruturas poderá atingir no núcleo temperaturas algures entre 80 e 90°. Segundo Y. Frostig¹, a estas temperaturas as propriedades anulam-se, em termos práticos. Assim, fará todo o sentido considerar apenas as peles, possibilitando de novo considerar um modelo de cascas. O gráfico da Figura 8.31 mostra o módulo à compressão de uma espuma estrutural em função da temperatura.

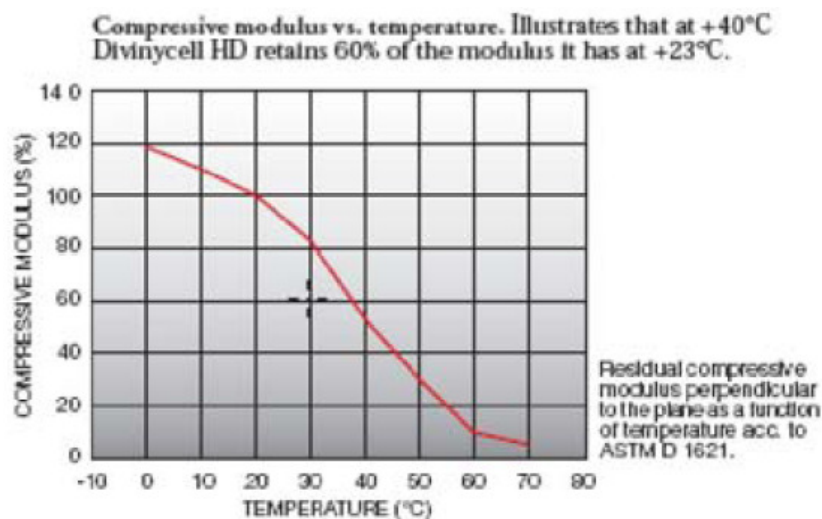


Figura 8.31: Módulo de compressão de uma espuma estrutural em função da temperatura

Uma outra fonte de incerteza são os cortes necessários para conseguir acomodar as fibras

¹NON-LINEAR HIGH-ORDER RESPONSE OF HEATED SANDWICH PANELS WITH A TRANSVERSELY FLEXIBLE CORE, in Advanced School on Sandwich Structures 2008, May 3-5, 2008, Porto, Portugal

na zona curva do molde (canto do pilar). A construção dos pilares mostrou que a geometria adoptada levanta problemas muito sérios de acomodação e que esses cortes são absolutamente necessários para obter uma aproximação minimamente aceitável ao laminado desejado. Os empilhamentos teóricos tornam-se irrealistas nessas zonas. Uma solução será tornar o empilhamento quase isotrópico, em resultado duma sobreposição (aleatória) de camadas de fibra, mas mantendo a mesma espessura, colocando-nos no lado da segurança. Os critérios de dano não são aplicáveis nestas áreas.

Finalmente, quando foi feita a simulação do ensaio do canto do pilar, deparou-se com graves problemas numéricos, que se devem, pelo pudemos apurar, à geometria do pilar. Independentemente das cargas ou condições fronteira testadas, a simulação divergia sempre. Relaxou-se então o nível de exigência, e procedeu-se a uma análise linear. Logo à partida, esta opção é muito má para a situação de capotamento. No entanto, mesmo nestas condições, os resultados obtidos nada tem a ver com os resultados dos ensaios. Levanta-se assim uma forte suspeita sobre os resultados obtidos a partir da malha completa donde se extraiu a malha do canto. Os erros numéricos poderão estar camuflados, mas não ausentes. A Figura 8.32 mostra o canto já em carga durante o ensaio e o detalhe dos resultados numéricos obtidos com o modelo linear. Neste detalhe, nota-se que o deslocamento se dá essencialmente na central superior de pele, como se esta não tivesse a rigidez que a mesma pele apresenta no modelo do pilar recto e, obviamente no componente real. Como consequência directa deste facto, a deformação global do componente, as forças e as tensões não correspondem à realidade. A gravidade deste problema, a ocorrer no modelo da secção completa, torna-se mais séria por ser esta a zona do pilar onde se dá o impacto. Na Figura 8.20, vemos que no modelo de elementos sólidos este problema é menos acentuado.

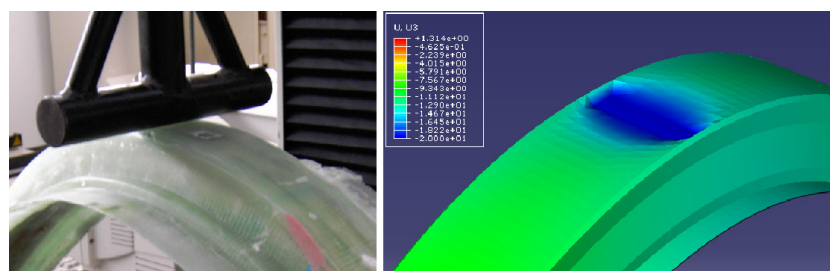


Figura 8.32: Detalhe dos resultados numéricos

Estas conclusões preliminares levantaram a necessidade de reformular algumas das hipóteses. Foi abandonado nesta fase inicial da concepção, o objectivo de conseguir um modelo que simultaneamente nos informasse sobre a deformação da estrutura e do dano que nela se desenvolve. Esta simultaneidade era importante porque permitiria ainda considerar a degradação das propriedades mecânicas ao longo do evento em estudo.

Os resultados dos modelos com malhas de elementos sólidos e propriedades dos materiais corrigidas artificialmente nos cantos dos pilares, foram construídos levando em consideração

os resultados dos ensaios feitos ao canto do pilar e aos pilares rectos. Serão em breve validados com o ensaio dos protótipos de secção que estão já a ser contruídos.

Ambas as análises modais indicam que a frequência fundamental será da ordem dos $2.6s^{-1}$, valor praticamente igual aos valores encontrados pelos construtores de autocarros para as configurações correspondentes: estrutura em "caixa" livre-livre. Dado que a massa é menor na estrutura compósita é de esperar que esta tenha uma rigidez maior.

A análise térmica não nos faz prever valores elevados de tensões residuais nas partes rectas dos pilares. Nos cantos, é notório que os resultados não são correctos dado que se referem a materiais com propriedades que não correspondem à realidade. A contracção durante a cura será decerto importante nos cantos e esse aspecto deverá ser investigado futuramente.

Página intencionalmente em branco

Parte VI

Conclusões finais e trabalhos futuros

CAPÍTULO 9

Conclusões finais

Neste trabalho, foi investigada a possibilidade de construir uma carroçaria de autocarro de turismo usando sanduíches multimateriais compósitas e da verificação da conformidade da estrutura de acordo com o regulamento UNECE R66, usando um método expedito mas fiável, passível de ser usado em ambiente industrial.

Embora o fim da realização dos trabalhos decorra num estágio do desenvolvimento da estrutura onde a solução proposta não apresenta ainda a rigidez necessária para cumprir os requisitos regulamentares, torna-se já evidente que pequenas alterações permitirão que tal seja conseguido. As alterações que estão a ser consideradas são o reforço transversal do núcleo da sanduíche nos troços do pilar mais solicitados à flexão, tal como foi feito no pilar FEUP-Bus, e a incorporação de perfis pultrudidos em resina epoxídica reforçada com fibras de carbono, que são de produção corrente para o reforço estrutural, em obras de recuperação, de estruturas de edifícios e pontes de betão armado. Podemos assim concluir que o primeiro ponto do nosso objectivo é alcançado com sucesso. O mesmo acontece com o segundo ponto, mas teremos que analisar esse sucesso em cada um dos seus aspectos mais relevantes.

Para a verificação da conformidade será necessário dispor simultaneamente da completa caracterização dos materiais, do conhecimento dos processos de produção (em especial, dos aspectos que modificam o comportamento dos materiais), de um programa de elementos finitos capaz de resolver o problema em causa e que permita a utilização de um critério para tratar o dano (acumulado) que se vai verificando no material ao longo do carregamento imposto para simulação quase estática do capotamento e de resultados de ensaios experimentais de componentes.

Quanto aos materiais, a caracterização pode ser considerada completa quanto ao comportamento elástico e quanto ao dano, se for considerado o critério de Hashin. Para os modelos locais e que usam malhas mais refinadas, poder-se-á usar o LaRC03. Seria então necessário

fazer um programa de ensaios experimentais para a obtenção dos dados em falta.

Os processos poderão ser estudados em mais detalhe, numa fase mais adiantada da concepção onde a definição esteja completa, por forma a avaliar os efeitos da contracção térmica e química, em especial, as tensões residuais, bem como averiguar a qualidade dos laminados resultantes, em termos de volume de fibras, presença de vazios ou fissuras, entre outros.

Quanto ao programa, devemos admitir que o ABAQUS no coloca numa posição confortável, embora não tenhamos conseguido evitar surpresas como as que ocorreram nos cantos do pilar. Vimos também algumas limitações intrínsecas ao método como as que se sentem na tentativa de modelar diferentes opções construtivas da mesma secção dos pilares. Numa primeira reformulação de hipóteses, optou-se pela modelação elástica da estrutura, usando malhas de elementos sólidos, onde a utilização do critério de Hashin se torna impossível, e corrigindo artificialmente as propriedades elásticas dos materiais nos cantos do pilar. A segunda reformulação das hipóteses só fará sentido depois desta ser solidamente validada através dos ensaios de capotamento do protótipos de anéis completos e secções de carroçaria que estão agora a começar a ser construídos. Aí poderemos considerar a sub-modelação das zonas críticas ou a modelação parcial do componente para nestas zonas. Embora a sub-modelação levante alguma desconfiança quando se pretendem análises rigorosas, poderá eventualmente constituir um compromisso satisfatório e útil para este tipo de exercício.

Os componentes produzidos e os ensaios realizados foram suficientes para podermos avaliar criticamente os resultados dos modelos numéricos. A metodologia empregue centra-se no cálculo quase-estático baseado no ensaio de componentes como método equivalente de aprovação, de acordo com Anexo 8 do R66. Os modelos foram validados experimentalmente e os resultados foram comparados com os obtidos por outros parceiros do projecto LiteBus. Os modelos foram também melhorados gradualmente levando em consideração as sucessivas discussões em grupo.

Podemos concluir que é viável modelar a estrutura recorrendo ao método dos elementos finitos, usando malhas de elementos sólidos. Com a utilização da malha de elementos sólidos não foram identificados problemas tão graves como os que foram identificados nos modelos com malhas de elementos de cascas e que impediam a conclusão das análises. Mesmo assim, a rigidez prevista nos cantos do pilar é superior à real, determinada nos ensaios experimentais. Por esta razão, torna-se necessário alterar as propriedades dos materiais nessas zonas por forma a conseguir uma previsão correcta da deformada global da estrutura, mesmo sob pena de não poder prever as tensões que realmente ocorrem nos cantos do pilar.

Não foi viável a utilização de critérios de dano na análise da estrutura completa da secção, uma vez que detalhes potencialmente muito relevantes não são considerados à escala em questão ou não estão sequer definidos ainda, e porque seria necessário utilizar malhas com elementos de cascas para as quais não foi possível obter resultados representativos. Numa fase mais avançada da concepção, os detalhes estarão definidos e algumas zonas

dos componentes, identificadas como sendo críticas, podem ser estudadas em detalhe, aí sim, usando malhas de elementos de casca e critérios dano. Para essas análises poderão ser aplicadas as condições de fronteira consistentes com a análise global da estrutura. Caso as dimensões do modelo o permitam, a malha poderá ser ainda mais refinada e recorrer-se ao LaRC03.

Página intencionalmente em branco

CAPÍTULO 10

Trabalhos futuros

Muitos trabalhos ficam ainda por fazer.

Nos modelos correspondentes às soluções construtivas que sejam adoptadas como resposta à falta de rigidez que se observou na actual, deverá ser feita a sub-modelação das zonas críticas. Os sub-modelos deverão ser feitos com elementos que permitam a utilização de critérios de dano. Alternativamente, poderá ser tentada a modelação parcial das referidas zonas críticas.

Deverá ser averiguado com mais profundidade as causas dos problemas numéricos encontrados nos cantos do pilar, em especial nos modelos com malhas de elementos de cascas.

Deverá ser feita a recolha de dados e validação experimental, que permita levar em consideração a variação das propriedades mecânicas imposta pelas condições de serviço do veículo ou pelo tempo decorrido em serviço.

As tensões residuais provocadas pela cura da resina deverão ser estudadas, até se estar em condições de as considerar nos modelos numéricos, para análise quase-estática do capotamento.

As ligações adesivas representam ainda um problema não definitivamente resolvido, dada a dificuldade de conseguir uma elevada reprodutibilidade dimensional na construção dos chassis. A solução mais eficaz passará eventualmente pela substituição do próprio chassis por uma estrutura sanduíche multi-material.

Fazer a correlação dos resultados dos modelos numéricos com os das medições feitas com os sensores FBG embebidos nos componentes ensaiados.

Página intencionalmente em branco

Parte VII

Índice remissivo

Página intencionalmente em branco

ABAQUS, 37, 38

Body in white, 25

Carroçaria em branco, 25

delaminação, 36

Directiva 2001/85/CE, 30, 31

fiber kinking, 35, 36

Hashin, 132

LaRC03, 35

mecanismos de rotura, 36

Objectivos do LiteBus, 25

programa de trabalhos, 26

RTM, 58, 66

RTM-Light, 58

SCRIMP, 57

SRIM, 56

teoria de Hashin, 38

UNECE, 30

UNECE R66, 30–32, 114, 132, 136, 158

VARTM, 58, 59

Veículos de serviço público, 24

VSP, 24